Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Stefan Detering
aus (Geburtsort): Vechta

eingereicht am: 16.11.2010

mündliche Prüfung am: 03.02.2011

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

2011

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig in den Jahren 2004 bis 2010.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder, danke ich für die wertvolle Unterstützung und fachliche Betreuung meiner Arbeit sowie für die wohlwollende Begleitung meines bisherigen beruflichen Werdegangs.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, Leiter des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor, Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüberhinaus bedanke ich mich bei allen ehemaligen Kollegen, Studenten und allen weiteren Personen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt hierbei Hansjörg Manz für die Durchführung der Versuchsfahrten sowie Matthias Hübner für die vielen wertvollen Fachgespräche. Wichtige fachliche Unterstützung habe ich zusätzlich von Timo Schneider erhalten, den ich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowohl bei der Verfassung seiner studentischen Arbeit als auch als studentische Hilfskraft betreuen konnte. Auch ihm gilt mein Dank.

Schließlich danke ich ganz herzlich meinen Eltern, die mir mein Studium an der Technischen Universität Braunschweig ermöglicht und mich auf meinem Lebensweg bis heute immer unterstützend begleitet haben.

Am meisten danke ich meiner Frau Ina und meiner Tochter Finja, die während der Erstellung dieser Dissertation viele Abende und Wochenenden geduldig auf mich verzichtet und mir für die Anfertigung meiner Arbeit den „Rücken frei“ gehalten haben.

Braunschweig, im Februar 2011

Die weltweite Nachfrage nach Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht überschreiten - allein schon aus Mangel an Chauffeuren.
Gottlieb Daimler, 1834 - 1900

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Kurzfassung

Eine Verkehrsoptimierung auf deutschen Autobahnen erfolgt bislang vorwiegend infrastrukturseitig. Neue Ansätze zur Verkehrsoptimierung auf Fahrzeugebene sind sogenannte Verkehrsassistenzsysteme (VAS), die die Längsdynamik einzelner Fahrzeuge regeln, um insgesamt den Verkehrsfluss zu optimieren.

In der vorliegenden Arbeit wird basierend auf einem generischen Systemmodell eine systematische Herleitung der Anforderungen zur Untersuchung der Auswirkung dieser Systeme auf den Verkehrsablauf vorgenommen. Dabei wird belegt, dass die Untersuchung eines VAS die gleichzeitige Berücksichtigung der mikroskopischen und makroskopischen Ebene in Verkehrssimulationsmodellen während der Kalibrierung und Validierung bedingt. Da bisherige Anwendungen von Simulationsmodellen diese Anforderung nicht berücksichtigen, wird ein neuer Zwei-Ebenen-Ansatz zur Kalibrierung und Validierung aufgezeigt. Dieser erfordert für einen gegebenen Streckenabschnitt die gleichzeitige empirische und simulative Erhebung mikroskopischer und makroskopischer Kenngrößen.

In der Arbeit wird ein Messkonzept zur Ermittlung der notwendigen Kenngrößen ausgearbeitet. Zur Datenerhebung aus Fahrzeugsicht wurde ein Versuchsfahrzeug ausgerüstet. Die vorliegende Arbeit zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung auf mikroskopischer Ebene des Fahrzeugfolgemodells nach Gipps auf. Aufgrund des Umfangs der betrachteten Folgefahrten wird ein neuer Ansatz der mikroskopischen Validierung von Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens vorgestellt. Obwohl das ermittelte Messkonzept nicht vollständig realisiert wurde, konnten auch die Methoden der makroskopischen Validierung exemplarisch umgesetzt werden.

Die sich an diese Arbeit anschließende notwendige vollständige Umsetzung des aufgezeigten Messkonzepts und die Durchführung der vorgestellten Methoden zur Kalibrierung und Validierung werden es erlauben, die quantitativen Simulationsergebnisse mit einem höheren Grad an Vertrauen zu beurteilen.

Abstract

Up to now traffic optimzation on German highways is realized by systems based on the traffic infrastructure. Promising new attempts for traffic optimization at vehicle level are so-called traffic assistance systems (TAS) which regulate the longitudinal dynamics of single vehicles to optimize traffic flow.

In the present work, a systematic derivation of the requirements to the investigation of these systems' effects on traffic flow is carried out, based on a generic system model. It is proved that the investigation of a TAS requires the concurrent consideration of both, the microscopic and macroscopic level during the calibration and validation of traffic simulation models. It is shown that present attempts of calibration and validation do not fulfil these requirements. Hence, as a solution a new two-level approach for calibration and validation is introduced. This requires the concurrent empiric and simulative acquisition of microscopic and macroscopic measurement data in such a manner that they share both, the same time and geographical reference.

A plausible concept for data acquisition is proposed in this work. For data acquisition an experimental vehicle was set up. The present work presents the results of the calibration at microscopic level of the Gipps car-following model. On account of the amount of considered situations in which one vehicle is following another vehicle, a new approach for validation of car-following models on microscopic level is introduced. Although the proposed data acquisition concept was not realized entirely, the methods for validation on the macroscopic level could also be realized exemplarily.

The necessary entire realization of the proposed data acquisition concept and proposed methods of calibration and validation will allow for an examination of the effects of TAS in traffic simulation models and a more sound evaluation of the quantitative results of the investigations.

1 Einleitung

Die Motivation dieser Arbeit besteht darin, den bisher über Infrastrukturmaßnahmen gesteuerten Verkehrsfluss auf Autobahnen zukünftig auch über Assistenzsysteme in Fahrzeugen zu optimieren. Dabei ist das Ziel, eine Methode aufzuzeigen, wie zukünftig eine quantitative Bewertung der Auswirkungen dieser neuen Systeme auf den Verkehrsfluss mit einem hohen Grad an Vertrauen in die Ergebnisse möglich werden kann. Abschnitt 1.1 stellt diese Motivation und das Ziel ausführlich dar und beschreibt den gewählten Ansatz. Die Einordnung der Arbeit zum Stand der Wissenschaft wird in Abschnitt 1.2 vorgenommen und die Struktur der Arbeit wird in Abschnitt 1.3 vorgestellt.

1.1 Motivation, Ziel und Ansatz

Mobilität und Verkehr sind heute Grundvoraussetzung für Wirtschaft und Gesellschaft. Die zunehmende örtliche Differenzierung der sozialen Funktionen Wohnen, Arbeit und Freizeit haben zu einer starken Zunahme des motorisierten Individualverkehrs geführt. Aufgrund seiner zentralen Lage in Europa ist Deutschland eine bedeutende Drehscheibe für den internationalen Verkehr. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung der Länge des deutschen Autobahnnetzes, der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) sowie der Jahresfahrleistung für die Jahre von 1975 bis 2008.

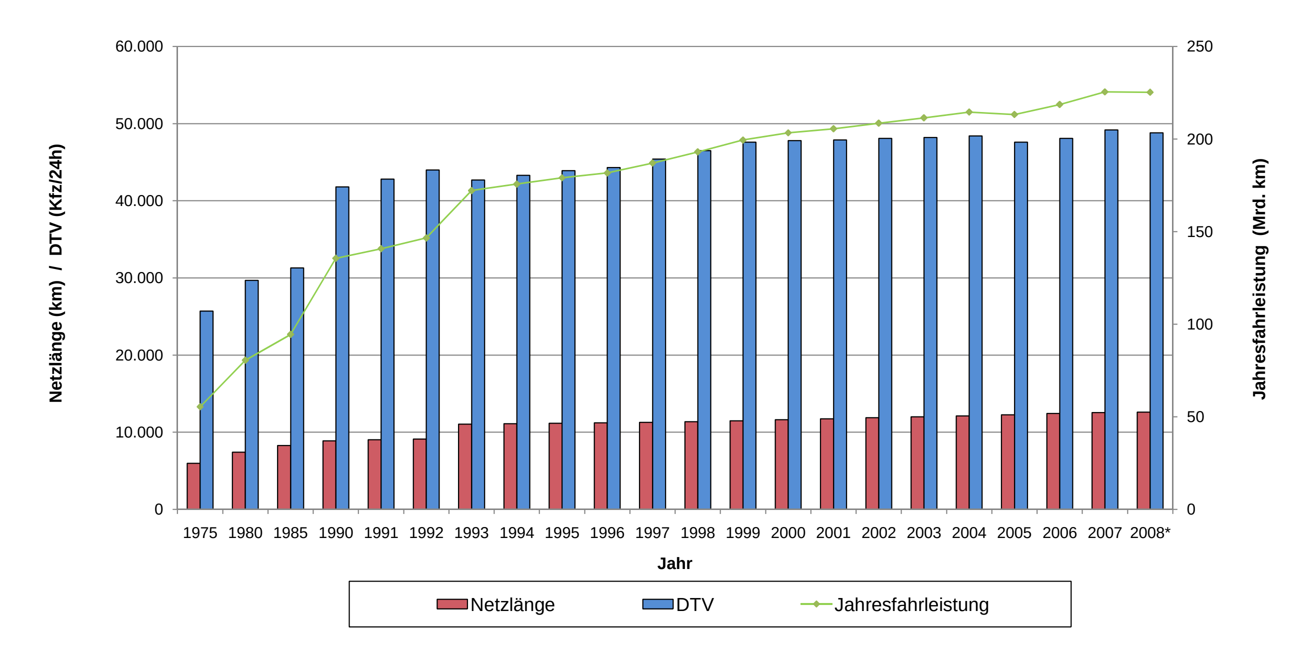


Abbildung 1.1: Straßenbelastung - Kraftfahrzeugverkehr auf Autobahnen (DTV = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz je 24h; bis 1992 alte Bundesländer; * = vorläufige Werte), nach [Bun09a]

Die DTV gibt die Anzahl der Kraftfahrzeuge (Kfz) in beiden Fahrtrichtungen an, die im Durchschnitt in 24 Stunden einen Straßenquerschnitt durchfahren. Die DTV eines Straßennetzes wird aus den mit der Länge gewichteten DTV-Werten der einzelnen Streckenabschnitte ermittelt [Zen07]. In den fünfzehn Jahren von 1993 bis 2008 ist die Autobahnnetzlänge um 14 % gestiegen. Trotz des Ausbaus des Straßennetzes ist die DTV durch einen fortschreitenden Zuwachs geprägt und hat im genannten Zeitraum von ca. 43 000 Kfz/24h auf ca. 49 000 Kfz/24h und damit um 14 % zugenommen. Dementsprechend ist die jährliche Fahrleistung, die sich als Produkt von DTV-Wert, Netzlänge und der Anzahl der Tage eines Jahres (365) ergibt, im gleichen Zeitraum um mehr als 30 % gestiegen. Die Osterweiterung der EU, die Globalisierung und eine zunehmend arbeitsteilige Wirtschaft werden in Zukunft zu einem weiteren Anwachsen von Personen- und Güterverkehr führen. Bis zum Jahr 2025 ist ein Zuwachs von 16 % für den motorisierten Individualverkehr und von 71 % für den Straßengüterverkehr prognostiziert [BK10].

Die Anforderungen an ein Verkehrssystem sind der sichere, effiziente und komfortable Transport von Personen und Gütern. Einhergehend mit der oben aufgezeigten Entwicklung sind immer häufiger kilometerlange Staus auf Autobahnen zu beobachten, die täglich einen geschätzten volkswirtschaftlichen Schaden von 280 Millionen Euro verursachen [ADA09], [Akt07]. Die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“ [Küh05], [HBS01] ist die *Kapazität*. Zur Staubildung kommt es, wenn eine zu große Nachfrage nach Kapazität einem zu geringen Angebot an Kapazität gegenübersteht [BKR08]. Die Ursache für Staus ist in mehr als der Hälfte aller Fälle ein zu hohes Verkehrsaufkommen (vgl. Abbildung 1.2) [Bun08],[Zap10] - die Nachfrage übersteigt die vorhandene Kapazität. Unfälle und Baustellen verringern die ursprünglich vorhandene Kapazität [Rie10] und sind damit ebenfalls häufige Stauursachen.

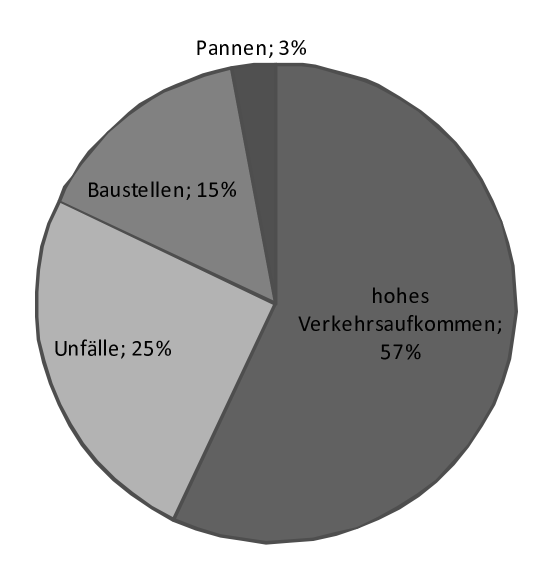


Abbildung 1.2: Ursachen für Staus auf Autobahnen, Quelle: [Bun08]

Nicht nur auf nationaler Ebene ist ein zu hohes Verkehrsaufkommen Stauursache Nummer eins. 10 % des Straßennetzes der EU sind von täglichen Staus betroffen [MKK+06]. In einer Umfrage unter Infrastrukturbesitzern, Verkehrsmanagern, Automobilclubs und Experten in Europa wurden von 44 % der Befragten die begrenzte Straßenkapazität und

hohes Verkehrsaufkommen als Stauursache genannt [MMB01b].

Um eine Staubildung zu vermeiden, wird versucht, die Verkehrsnachfrage insbesondere zu den kritischen Zeiten zu verringern. Dieses Ziel kann aufgrund von vorgegebenen Tagesabläufen (Arbeitsbeginn, Schulbeginn, Arbeitsende, etc.) allerdings nur eingeschränkt erreicht werden. Alternativ wird versucht, die notwendige Kapazität zur Verfügung zu stellen. Ansätze hierzu sind Kapazitätseinbrüche durch Baustellen oder Unfälle zu vermeiden sowie die vorhandene Kapazität durch konstruktiven Ausbau der Straßeninfrastruktur zu erhöhen. Letztere Variante ist dabei aus ökologischen und finanziellen Gründen nur eingeschränkt möglich.

Neben diesem konstruktiven Ansatz werden daher zunehmend operative Ansätze verfolgt, um die vorhandene Infrastruktur besser zu nutzen. Da die Infrastruktur in Schwachlastzeiten nicht ausgelastet ist, dafür zu Verkehrsspitzenzeiten oft die vorhandene Kapazität überschritten wird, muss für eine Sicherung der Mobilität der Verkehr effizienter als auch sicherer gestaltet werden.

Möglichkeiten der Verkehrssteuerung auf Autobahnen können hinsichtlich der Einsatzebene unterschieden werden (Tabelle 1.1). Eine Beeinflussung erfolgt bisher ausschließlich auf der Netz- sowie auf der Trassenebene [Dög07]. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) stattet kritische Bereiche von Autobahnen und teilweise auch Bundesstraßen mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) aus, die nach ihrer Einsatzebene in Netzbeeinflussungsanlagen (NBA), Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) und Knotenpunktbeeinflussungsanlagen (KBA) unterschieden werden können [Mar99]. Mit NBA können großräumig Verkehre im Straßenverkehrsnetz zu einem Ziel über alternative Strecken geleitet werden. Diese Maßnahme wird als Routenführung bezeichnet. Auf Trassenebene ist es das Ziel, den Verkehrsfluss auf einem bestimmten Streckenabschnitt zu harmonisieren, um dadurch den Verkehr sicherer und effektiver zu machen. Eingesetzt werden SBA zur Beeinflussung des Verkehrs entlang der Strecke über Wechselverkehrszeichen (WVZ) als auch KBA zur Störungsreduktion an Knotenpunkten, z. B. durch Zuflusssteuerung (dem sogenannten „ramp metering“) [Mar99], [Str01].

Tabelle 1.1: Handlungsebenen der Verkehrssteuerung auf Autobahnen

Ebene	**Beeinflussungsmöglichkeiten**	**Realisierung**
Netzebene	Routenführung	Netzbeeinflussungsanlagen (NBA)
Trassenebene	Geschwindigkeitsbeschränkungen Überholverbote Warnungen (Wetter, Stau, etc.) Zuflussbeschränkungen	Streckenbeeinflussungs- anlagen (SBA) Knotenpunktbeeinflussungs- anlagen (KBA)
Fahrzeugebene	Geschwindigkeitsverhalten Abstandsverhalten Fahrstreifenwahl und -wechselverhalten	nicht vorhanden

Abbildung 1.3 zeigt die Funktionsebenen des Systems „Verkehrsbeeinflussung“ [Mar99]. In den Streckenstationen (SS) werden die Datenerfassung sowie die Schaltung der WVZ vorgenommen [Sch07]. Die weitere Datenaufbereitung und die Generierung der Steuerungsbefehle für die SBA und KBA werden in einer Unterzentrale (UZ) durchgeführt. Die Steue-

rung unter Berücksichtigung des Gesamtnetzes (NBA) findet in der Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) statt, ebenso die Überwachung und Koordinierung.

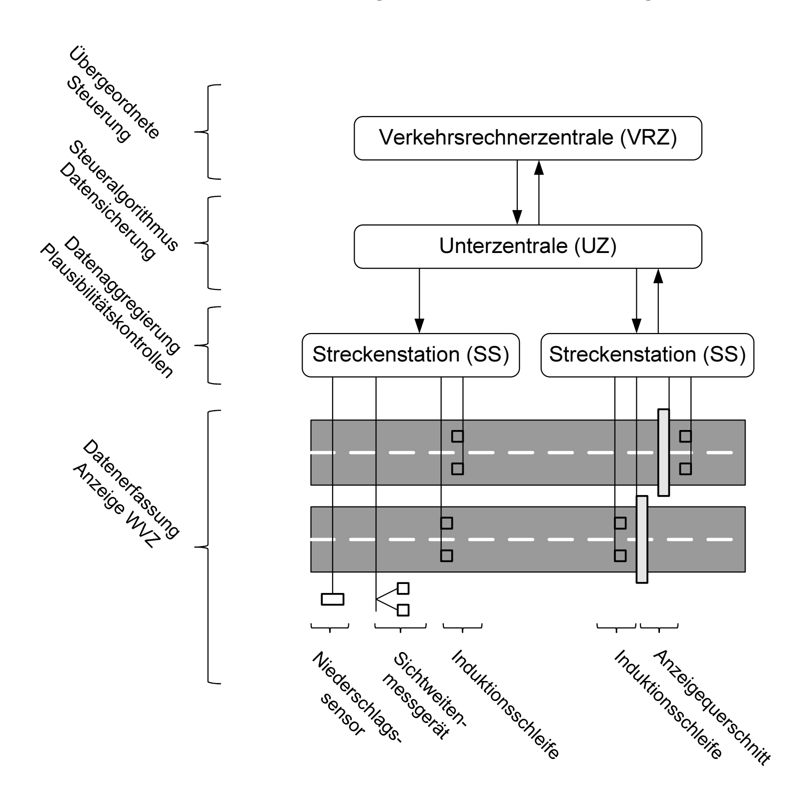


Abbildung 1.3: Funktionsebenen des Systems Verkehrsbeeinflussung, nach [Mar99]

Die Messwerterfassung wird stets an örtlich festgelegten Stellen, z. B. mit Induktionsschleifen, Radar-, Infrarot- oder Ultraschalldetektoren sowie Videosystemen, vorgenommen [Höf06]. Der Abstand der Messstellen im deutschen Autobahnnetz im Bereich von Verkehrsbeeinflussungsanlagen variiert zwischen 0,3 km und 3 km [FKW01]. Die aufgenommenen Messwerte werden nicht vollständig, sondern in der Regel als sogenannte Kurzzeitdaten im 1-Minutenzyklus gemittelt und als aggregierte Messgrößen an die UZ übertragen. Mit diesen Daten ist es aufgrund der Verletzung des Abtasttheorems nicht mehr möglich, die vollständige Dynamik des Verkehrsablaufs in der UZ zu erfassen und auszuwerten. Eine Verkehrsstörung, die sich zwischen zwei Messstellen ereignet, kann erst durch Veränderungen der Messwerte an der stromaufwärts oder stromabwärts liegenden Messstelle erkannt werden. Im ungünstigen Fall kommen lange Übertragungszyklen mit weit auseinanderliegenden Messstellen zusammen. Dadurch können Störfälle im Verkehrsablauf nur mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung erkannt werden.

Neben der zeitlichen Verzögerung bei der Störungserkennung wirkt aufgrund der eingesetzten Infrastruktur von WVZ die Streckenbeeinflussung stets nur auf örtlich begrenzte Streckenabschnitte. Dabei wird stets das zukünftig in den nachfolgenden Streckenabschnitt einfahrende Fahrzeugkollektiv beeinflusst. Eine Anpassung des Verhaltens des betreffenden Kollektivs ist frühestens beim Passieren des nächsten Wechselverkehrszeichens möglich.

In Deutschland sind zurzeit rund 1 300 km des 12 600 km umfassenden Autobahnnetzes mit Streckenbeeinflussungsanlagen ausgestattet [Bun09b]. Eine weitere Ausstattung kostet in der Anschaffung pro km zwischen 200 000 und 350 000 Euro. Hinzu kommen die laufenden Kosten, sodass diese Systeme auch zukünftig nicht flächendeckend verfügbar sein

werden [Rie10]. In [Leh06] wurde allein für eine flächendeckende Verkehrserfassung auf staugefährdeten Streckenabschnitten des Autobahnnetzes von Niedersachsen sowie ausgewählter Bundesstraßen der Großräume Hannover, Oldenburg, Hamburg, Braunschweig, Bremen und Osnabrück ein Bedarf von 373 zusätzlichen Messquerschnitten als Minimalkonzept ermittelt.

Neue vielversprechende alternative Ansätze „die Leistungsfähigkeit des Straßenverkehrs zu erhöhen und den Verkehr effizienter abzuwickeln, bestehen darin, das individuelle Fahr- und Verkehrsverhalten optimal an die jeweilige Umgebungssituation anzupassen“ [Vol02]. Ermöglicht wird dies durch Assistenzsysteme, die über eine reine Fahrerassistenz hinausgehen und im Folgenden als Verkehrsassistenzsysteme (VAS) bezeichnet werden. Mit den Informationen über das eigene Fahrzeug und die umgebenden Fahrzeuge kann eine möglichst verzögerungsfreie und lokal fein aufgelöste Verkehrszustandserkennung auf dem Fahrzeug selbst realisiert und darauf aufbauend eine optimale individuelle Fahrstrategie entwickelt werden. Damit kann die bisherige Beeinflussung des Verkehrs auf Netz- und Trassenebene durch eine Optimierung auf Fahrzeugebene erweitert [Bee10] (siehe Tabelle 1.1) und der kostenintensive Ausbau der Infrastruktur begrenzt werden. Auch in der Verkehrsdomäne des Schienenverkehrs gibt es Ansätze die Leistungsfähigkeit dadurch zu erhöhen, dass die Ortung des Zuges nicht mehr durch die Infrastruktur sondern auf dem Einzelfahrzeug realisiert wird [May10], [BHP+07].

Eine Verbesserung des Verkehrsflusses, die der Dynamik des Straßenverkehrs gerecht wird und nicht durch eine feste Streckeneinteilung eingeschränkt ist, kann nur auf Fahrzeugebene realisiert werden. Durch eine Verkehrsflussoptimierung auf dem Einzelfahrzeug können Restriktionen wie dauerhafte Geschwindigkeitsbegrenzungen entlang der Strecke, die zurzeit auf beinahe 30 % der deutschen Autobahnen vorhanden sind [Sch10a], unnötig werden. Dieses bringt sowohl für alle Beteiligten einen volkswirtschaftlichen Nutzen, als auch für den einzelnen Fahrer die Möglichkeit, bei wenig Verkehr die „Freude am Fahren“ zu erhalten und bei dichterem Verkehr sicher und effizient sein Ziel zu erreichen. Erste Ansätze für diese Art von Assistenzsystemen liegen bereits vor und werden in Abschnitt 1.2 vorgestellt.

Gleichzeitig ergeben sich für den Einsatz im Straßenverkehr neue Anforderungen im Bereich der Auslegung und Bewertung dieser den Verkehr optimierenden Assistenzsysteme, die bisher nicht ermittelt und daher auch nicht berücksichtigt wurden. In der Arbeit wird aufgezeigt, dass für die Untersuchung dieser Systeme Simulationsuntersuchungen notwendig sind. Die in der Untersuchung ermittelten Auswirkungen dieser Systeme auf den Verkehrsfluss beruhen auf einer Vielzahl von Faktoren, sodass diese Untersuchung mit einem methodischen Konzept angegangen werden muss. *Das Ziel der Arbeit* besteht darin, eine Methode aufzuzeigen, wie zukünftig eine quantitative Bewertung der Auswirkungen dieser neuen Systeme auf den Verkehrsfluss mit einem hohen Grad an Vertrauen in die Ergebnisse möglich werden kann.

Zur Erreichung des Ziels werden im *gewählten Ansatz* zuerst die Anforderungen an eine Simulationsuntersuchung zur Bewertung dieser neuen Systeme ermittelt. Anschließend wird für diese Simulation eine geeignete Kalibrierungs- und Validierungsmethode entworfen sowie ein geeignetes Messkonzept zum Erhalt der notwendigen Messdaten ausgearbeitet. Abschließend erfolgen eine exemplarische Umsetzung des vorgestellten Messkonzepts und die exemplarische Anwendung der Kalibrierungs- und Validierungsmethode, die die Machbarkeit, aber auch die zu erwartenden Herausforderungen der Methode und des Konzepts aufzeigen.

1.2 Stand der Wissenschaft

Während es eine Vielzahl an Forschungsarbeiten und Richtlinien zur Beeinflussung des Verkehrs auf Netz- und Trassenebene gibt, existieren auf dem Gebiet der Verkehrsoptimierung auf Fahrzeugebene erst wenige Arbeiten, die im Folgenden dargestellt werden.

Die Ziele des Forschungsvorhabens „Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik" (INVENT), welches in den Jahren 2001 bis 2005 durchgeführt wurde, waren eine Effizienzsteigerung und Verbesserung der Sicherheit des Verkehrsablaufs, der Ausgleich individueller und gesellschaftlicher Ziele, die Selbstorganisation des Verkehrs sowie nutzergerechte Technik [Bol06]. Im Teilprojekt „Verkehrsleistungsassistenz" (VLA) wurden Technologien entwickelt, die den Verkehrsfluss bei hohem Verkehrsaufkommen verbessern sollten [IB05].

Im Rahmen dieses Projekts wurde identifiziert, dass eine verkehrsangepasste Fahrstrategie notwendig ist, um Störungen zu vermeiden und den Verkehrsfluss zu harmonisieren. Hierfür wiederum ist ein vorausschauendes Fahren notwendig, sodass im Rahmen des Projektes daran gearbeitet wurde, aus lokalen Umgebungsdaten eines Fahrzeugs den aktuellen lokalen Verkehrszustand zu rekonstruieren. Mit der generierten Information konnte die Regelung eines auf dem Markt erhältlichen Adaptive Cruise Control Systems (ACC-System, auch als adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung bezeichnet), ein System zur automatischen Anpassung von Geschwindigkeit und Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug (siehe Abschnitt 3.1), durch einen Regler ersetzt werden, der seine Reglerparameter dynamisch dem Verkehrszustand anpasst. Bei diesem erweiterten ACC-System werden in Abhängigkeit von fünf Verkehrszuständen die drei Parameter der Folgezeitlücke, der Wunschbeschleunigung und der akzeptierten komfortablen Bremsverzögerung variiert, sodass sich eine 3×5 Matrix für die Parameterwerte ergibt. Das erweiterte ACC-System realisiert mit diesen Parameterwerten in Abhängigkeit des Verkehrszustands [IB05] ein unterschiedliches Fahrverhalten:

- „Im freien Verkehr: normales Fahrverhalten
- Bei Stauannäherung: frühzeitiges, sanftes Bremsen für Sicherheit und Komfort
- Im Stau: normales Fahrverhalten
- An Störstellen: Verringerung des Folgeabstandes zur Steigerung der Kapazität
- Bei Ausfahrt aus dem Stau: zügiges und rechtzeitiges Beschleunigen zur Stauauflösung"

Details zu den durchgeführten Simulationsuntersuchungen wurden im Rahmen des Projekts nicht veröffentlicht. Da Teile der Dissertation von Kesting [Kes08] im Rahmen des INVENT Projektes entstanden sind, ist bekannt, dass die simulativen Untersuchungen mit dem „Intelligent Driver Modell" (IDM) durchgeführt wurden, das an der TU Dresden entwickelt wurde.

Kesting erstellt in seiner Dissertation sowohl ein Modell für die Modellierung von Folgefahrten (das IDM) als auch ein Modell zum Fahrstreifenwechsel („Minimizing Overall Braking Induced by Lane Change" (MOBIL)). Im zweiten Teil der Arbeit werden mit den zuvor aufgebauten Simulationsmodellen die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss bei unterschiedlicher Ausstattung von Fahrzeugen mit einem verkehrsadaptiven ACC-System

untersucht. Die Funktionsweise des untersuchten Assistenzsystems entspricht dem oben im Rahmen des INVENT Projektes vorgestellten System mit Anpassung von drei Systemparametern in Abhängigkeit von fünf Verkehrszuständen. Die Untersuchung des Assistenzsystems wird in zwei Verkehrssituationen vorgenommen. Zum einen untersucht der Autor einen Abschnitt einer mehrstreifigen Autobahn mit einer Einfahrt, zum anderen einen Abschnitt einer mehrstreifigen Autobahn mit einer Steigung entlang der Strecke. Die Ergebnisse der Simulation lassen eine Erhöhung der Verkehrsstabilität und der effektiven Straßenkapazität erwarten.

Die Auseinandersetzung mit den Anforderungen zur Untersuchung dieses Systems mit einer Simulation wird in der Dissertation nicht explizit behandelt. Forschungsarbeiten zum menschlichen Fahrzeugfolgeverhalten haben aufgezeigt, dass sowohl Unterschiede zwischen den Fahrern (Inter-driver-Variabilität) als auch eine Veränderung des Verhaltens des einzelnen Fahrers im Verlauf der Zeit (Intra-driver-Variabilität) beobachtet werden können [HLHZ09]. Da Kesting in der verwendeten Simulation für das menschliche Fahrzeugfolgeverhalten einheitliche Parameterwerte für alle menschlichen Fahrer annimmt, sind die quantitativen Ergebnisse der Dissertation kritisch zu hinterfragen. Der Autor führt in seiner Arbeit keine eigenen Datenerhebungen durch sondern verwendet zur Parameteridentifikation Messdaten von nur drei Folgefahrten aus dem Jahr 1995 aus einer frei zugänglichen Datenbasis [DLR08]. Diese Folgefahrten beschreiben innerstädtische Fahrzeugfolgefahrten mit einer gefahrenen Maximalgeschwindigkeit von 60 km/h mit einer Dauer von 250 s, 300 s bzw. 400 s. Punzo und Simonelli [PS05] haben in ihren Untersuchungen festgestellt, dass die mit Messdaten von Folgefahrten für Stadtverkehr identifizierten Parameterwerte stark von den Parameterwerten für Außerortsverkehr abwichen. Dies ist ein weiterer Grund, die quantitativen Ergebnisse der Arbeit kritisch zu hinterfragen. Der Autor schreibt in seiner Dissertation und in [KTSH08] selbst, dass die Untersuchung nur mit einem einfach aufgebauten Fahrzeugfolgemodell durchgeführt wurde und mit der Arbeit nur ein “proof of concept“ aufgezeigt werden sollte.

Die Weiterführung der Arbeiten aus dem INVENT Projekt fand in der Forschungsinitiative „Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr“ (AKTIV) in den Jahren 2006 bis 2010 statt [Akt08]. AKTIV umfasst die drei Projekte „Aktive Sicherheit“, „Cooperative Cars“ und „Verkehrsmanagement“, wobei Letzteres unter anderem die Applikationen „Virtuelle Verkehrsbeeinflussungsanlage“ und „Störungsadaptives Fahren“ beinhaltet.

Im Rahmen des „Störungsadaptiven Fahrens“ wurde das aus dem INVENT Projekt vorliegende verkehrsadaptive ACC-System für den Spezialfall einer Baustellendurchfahrt als „Baustellenlotse“ angepasst [PKS09], [KPKT10]. Die Anpassung erfolgte dabei insbesondere hinsichtlich der Verkehrszustandsermittlung. Zum Einsatz kommen zwei sogenannte Road Side Units (RSU), die zu Beginn (Zulauf-RSU) und zum Ende (Ablauf-RSU) der Baustelle mit den ausgestatteten Fahrzeugen kommunizieren. Die Fahrzeuge zeichnen während der Durchfahrt ihre Fahrzeugdaten auf und übermitteln diese an die Ablauf-RSU, die aus den Messwerten sowohl den Streckenverlauf ermittelt als auch die aktuelle Verkehrslage abschätzt. Diese Informationen werden den einfahrenden Fahrzeugen über die Zulauf-RSU zur Verfügung gestellt. Eine grafische Darstellung der Funktionsweise zeigt Abbildung 1.4. Die Reglerparameter des ACC-Systems werden in Abhängigkeit des aktuellen Verkehrszustands entsprechend der zuvor vorgestellten Parametermatrix angepasst.

Zur Untersuchung des Systems wird der aus der Dissertation [Kes08] bekannte Simula-

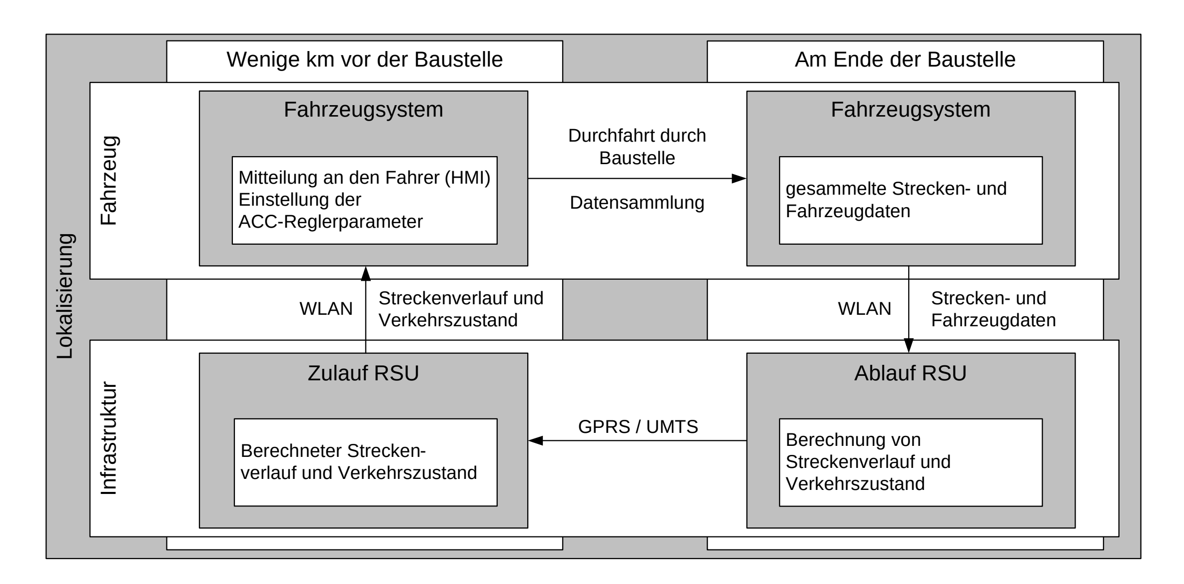


Abbildung 1.4: Darstellung der Funktionsweise des „Baustellenlotsen“

tionsansatz aus den Modellen IDM und MOBIL verwendet. Die Simulationen zeigen mit jedem Prozent an zusätzlich mit erweiterten ACC-System ausgestatteten Fahrzeugen eine Verringerung der Stauzeiten um ca. 3 % [KPKT10]. Dabei schränken die Autoren von [KPKT10] ihr Ergebnis selbst stark ein: „Auch wenn diesem Ergebnis einige idealisierende Annahmen der Simulation zugrunde liegen, erscheint bei einer Übertragung in die Realität eine Abnahme der gesamten Stauzeiten um 1 % pro 1 % ’intelligenter’ Verkehrsassistenzsysteme durchaus realistisch.“ Diese Einschätzung zeigt sehr gut, dass die verwendete Simulation und deren Anwendung im vorliegenden Fall keine verlässlichen quantitativen Aussagen erlauben.

Dass eine Verkehrsoptimierung im Baustellenbereich grundsätzlich möglich ist, zeigt hingegen [B.A09]. Hier wird beschrieben, dass in einem Baustellenbereich der A1 LED-Informationstafeln aufgestellt wurden, die bei dichtem Verkehr einen Hinweistext zeigten, dass im Baustellenbereich nicht „gebummelt“, sondern „zügig“ gefahren werden soll. Die Messungen ergaben eine Erhöhung der Verkehrsstärke um 20 %. Diese Idee der zügigen Baustellendurchfahrt ist vergleichbar mit der Realisierung des vorgestellten „intelligenten“ VAS, sodass bei richtiger Auslegung auch durch das VAS eine Verbesserung des Verkehrsflusses erwartet werden kann.

Die oben dargestellten Arbeiten untersuchten die Auswirkungen von Systemen, die eine Verkehrsoptimierung auf Fahrzeugebene anstreben. Zusätzlich zu diesen Arbeiten wurde bereits eine Vielzahl von Untersuchungen mithilfe von Verkehrssimulationen durchgeführt, um die Auswirkungen von herkömmlichen ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss zu untersuchen, bei denen vergleichbare Anforderungen an die Untersuchung zum Tragen kommen.

Einen sehr guten Überblick über die Untersuchungen der Auswirkungen von ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss der Jahre 1991 bis 1997 bietet die Literaturstudie von Zwaneveld und Arem [ZA97]. Die Autoren fassen insgesamt acht Simulationsuntersuchungen von ACC-Systemen, eine Untersuchung im Verkehrssimulator, zwei Untersuchungen mit realen ACC-Fahrzeugen und eine analytische Untersuchung zusammen. Die betrachteten Arbeiten berücksichtigten unterschiedliche Ausstattungsgrade, d.h. einen unterschied-

lichen prozentualen Anteil an ausgestatteten Fahrzeugen auf dem betrachteten Streckenabschnitt, und eingestellte Zeitlücken der ACC-Systeme. Die Bewertung der Systeme fällt in den betrachteten Arbeiten sehr heterogen aus. Die Ergebnisse reichen von einer Zunahme der Verkehrsstärke um 21 % bis hin zu einer Reduzierung der Verkehrsstärke um 13 %. Im Fall der Kolonnenbildung konnte in einer Simulationsstudie die Verkehrsstärke sogar um 200 % erhöht werden. Bei den Arbeiten, die keine quantitative Bewertung vornehmen, reicht die Beurteilung von „positive effects“ über „no differences“ bis hinzu „no negative effects“ und „collapse on left lane“. Eine neuere Übersicht zu Simulationsuntersuchungen von ACC-Systemen gibt VanderWerf in seiner Arbeit [VSK+01]. Die Darstellung der von ihm genannten Arbeiten ergibt wie bereits der Überblick von Zwaneveld und Arem ein ähnlich undifferenziertes Bild der Auswirkungen.

Die Autoren von [MMB01a] untersuchen mit einer Simulation die Auswirkung von ACC-Systemen auf den Verkehr und stellen dabei fest, dass mit zunehmender Ausstattung der Fahrzeuge mit ACC-Systemen die durchschnittliche Fahrzeit zunimmt, was insbesondere darauf zurückzuführen ist, dass der Verkehrsfluss auf dem dritten Fahrstreifen gestört wird. In der Simulation entstehen vorwiegend auf dem dritten Fahrstreifen Kolonnen von ACC-Fahrzeugen, zwischen die aber noch Fahrzeuge vom zweiten Fahrstreifen einscheren können. Durch das einscherende Fahrzeug ist bei dem hier implementierten ACC-System aufgrund der notwendigen starken Verzögerung des nachfolgenden Fahrzeugs der manuelle Eingriff des nachfolgenden Fahrzeugführers notwendig. Diese Verzögerung wirkt sich nach und nach auch auf die weiteren nachfolgenden Fahrzeuge aus. Insgesamt liegen die Veränderungen der Fahrzeit für alle Ausstattungsgrade, Fahrzeugdichten und Zeitlückeneinstellungen zwischen ca. -0,2 % und +2,6 %.

Einen Grund für die stark unterschiedlichen Ergebnisse der Untersuchungen von ACC-Systemen nennen die Autoren von [MMB01b]: „The main conclusion of all of these studies is that the impact of ACC on throughput and average speed is dependent on the difference between the target headway of the ACC system and the existing headway distribution within the motorway simulation model.“

Die Analyse des Standes der Wissenschaft hat gezeigt, dass bisherige Untersuchungen zu VAS nur als „proof of concept“ durchgeführt wurden und die Aussagekraft der quantitativen Simulationsergebnisse von den Autoren selbst eingeschränkt wurde. Der Vergleich von Untersuchungen herkömmlicher ACC-Systeme hat ein sehr heterogenes Bild der möglichen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss ergeben. Diese Erkenntnisse zeigen die Notwendigkeit eines methodischen Vorgehens auf, um zukünftig eine Bewertung der Auswirkungen von VAS auf den Verkehrsfluss mit einem hohen Grad an Vertrauen in die Ergebnisse zu ermöglichen.

1.3 Struktur der Arbeit

Die grafische Darstellung der Struktur der Arbeit in Abbildung 1.5 beinhaltet gleichzeitig eine schriftliche Beschreibung der Kapitelstruktur, sodass an dieser Stelle ausschließlich auf die grafische Darstellung verwiesen wird.

1. Einleitung

Die Motivation, die Ziele und der Ansatz der Arbeit werden erläutert. Anschließend wird eine Einordung der Arbeit zum Stand der Wissenschaft vorgenommen und die Struktur der Arbeit dargestellt.

2. Kenngrößen des Verkehrs und deren messtechnische Erfassung

Vorstellung der mikroskopischen und makroskopischen Verkehrskenngrößen. Bei der Erfassung wird zwischen lokalen und momentanen Messungen unterschieden. Es folgt die kritische Auseinandersetzung mit dem Fundamentaldiagramm.

3. Anforderungen an die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen

Die Ziele und eine mögliche Realisierung eines Verkehrsassistenzsystems (VAS) werden beschrieben. Die Anforderungen an eine Untersuchung der Auswirkungen des VAS auf den Verkehr werden ermittelt.

Grundlagen

4. Grundlagen zur Simulation eines Straßenverkehrssystems

Das Kapitel gibt eine Einführung in die Grundlagen der Modellbildung und stellt die etablierten Ansätze zur Modellierung von Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten dar. Abschließend werden die bekanntesten Verkehrssimulationswerkzeuge vorgestellt.

5. Kalibrierung und Validierung von mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen

Um aussagekräftige Simulationsergebnisse zu erhalten, ist eine Kalibrierung und Validierung der verwendeten Simulationsmodelle notwendig. Das Kapitel stellt diese Notwendigkeit sowie etablierte Methoden zur Kalibrierung und Validierung vor.

6. Kalibrierungs- und Validierungskonzept zur simulativen Untersuchung von VAS

Basierend auf den zuvor dargestellten Grundlagen wird ein Kalibrierungs- und Validierungskonzept, das den in Kapitel 3 ermittelten Anforderungen zur simulativen Untersuchung von VAS genügt, ausgearbeitet. Nach der Vorstellung der grundsätzlichen Methode werden die hierfür notwendigen Kenngrößen ermittelt. Es wird ein Messkonzept vorgestellt, das die gleichzeitige Erfassung von mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen erlaubt.

Exemplarische Anwendung der Kalibrierungs- und Validierungsmethode

7. Erhebung von empirischen Daten

Das Kapitel stellt ein im Rahmen der Arbeit aufgebautes Versuchsfahrzeug zur Erfassung mikroskopischer Kenngrößen, die Versuchsstrecke und die Messdatenaufbereitung dar. Die verwendeten makroskopischen Messdaten der Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) Hannover werden beschrieben.

8. Erhebung von Simulationsdaten

Das Kapitel zeigt auf, wie das Simulationswerkzeug AIMSUN verwendet wurde, um einen Vergleich von Simulation und Realität zu ermöglichen. Es wurde die Strecke in AIMSUN abgebildet und die Funktionalität erweitert, sodass die Erfassung von mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen in der Simulation möglich ist.

9. Mikroskopische Kalibrierung

Die erhobenen empirischen Messdaten wurden zur Kalibrierung des in AIMSUN verwendeten Fahrzeugfolgemodells verwendet. Die verwendete Methode zur Identifikation der Parameterwerte wird vorgestellt und die Ergebnisse werden bewertet. Abschließend wird eine Kalibrierung von Fahrstreifenwechselmodellen diskutiert.

10. Methoden zur mikroskopischen und makroskopischen Validierung

In diesem Kapitel werden Methoden zur Validierung des Simulationsmodells auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene vorgestellt, entworfen sowie exemplarisch für die vorhandenen Messdaten durchgeführt.

11. Gewonnene Erkenntnisse, Bewertung und weiterer Forschungsbedarf

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und bewertet. Der sich ergebende Forschungsbedarf wird ermittelt.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Die Inhalte der Arbeit werden zusammenfassend dargestellt und es wird ein Resümee der Arbeit gezogen.

Abbildung 1.5: Darstellung der Kapitelstruktur

2 Kenngrößen des Verkehrs und deren messtechnische Erfassung

„*Verkehr* wird im Allgemeinen als Ortsveränderung von Personen, Gütern oder Nachrichten definiert. Die dazu notwendigen Bewegungsvorgänge (Beschleunigen, Fahren, Bremsen etc.) werden als *Verkehrsablauf* bezeichnet“ [Küh05] (Herv. d. Verf.).

Die Bedeutung des Begriffs *Verkehrsfluss* ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. In einem Entwurf eines Merkblatts der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) [Küh04] wird folgende Erklärung gegeben, die allerdings in der endgültigen Fassung [Küh05] nicht mehr enthalten ist: „Im Bereich des Straßenverkehrs ... müssen [die Verkehrsteilnehmer] aber auf andere Verkehrsteilnehmer und Umfeldbedingungen Rücksicht nehmen. Diese Interaktion zwischen mehreren Fahrzeugen ergibt den *Verkehrsfluss*.“ sowie „Für den *Verkehrsfluss* als räumlich-zeitliches Ereignis ... “. Stattdessen enthält die Endfassung die Erklärungen: „Im Bereich des Straßenverkehrs können die einzelnen Verkehrsteilnehmer ihren *Verkehrsablauf* teilweise selbst bestimmen, ... müssen ... aber auf andere Verkehrsteilnehmer und Umfeldbedingungen Rücksicht nehmen.“ sowie „Für den *Verkehrsablauf* als räumlich-zeitliches Ereignis ... “.

Ein anderes FGSV Dokument trägt den Titel „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ [Tra06], gibt aber keine Begriffsdefinition für „Verkehrsfluss“. Im Fachbuch „Verkehrswesen-Praxis“ [Höf06] werden „Verkehrsablauf“ und „Verkehrsfluss“ synonym verwendet. Bei der Darstellung des Fundamentaldiagramms wird ein „stationärer Verkehrsfluss“ genannt, der zwei Seiten später mit „Stationarität von Verkehrsströmen“, „Stationarität des Verkehrsablaufs“ und „Prüfung ... eines Verkehrsflusses auf Stationarität“ beschrieben wird. Im Fachbuch „Verkehrsdynamik“ von Helbing [Hel97] und dem Eintrag in Wikipedia [Wik10] zum Stichwort „Verkehrsfluss“ wird die Benennung synonym für „Verkehrsstärke“ (vgl. Abschnitt 2.2) verwendet. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS01] nennt hingegen: „Die Qualität des Verkehrsablaufs ist die zusammenfassende Gütebeurteilung des Verkehrsflusses aus Sicht der Verkehrsteilnehmer“ und „Der Verkehrsfluss auf einem Autobahnabschnitt wird mit Hilfe der Größen Verkehrsstärke q und Geschwindigkeit V ... beschrieben.“

Im Rahmen dieser Arbeit soll die im Folgenden zitierte Definition von Schnabel und Lohse [SL97] verwendet werden:

> „Unter dem Begriff des **Verkehrsablaufs** soll die Gesamtheit der zeitlichen und räumlichen Abwicklung der Verkehrs- und Bewegungsvorgänge auf den Straßenverkehrsflächen, wie z. B. Fahren, Beschleunigen, Bremsen, Anhalten, Warten, Kreuzen, Überholen, Einfädeln, Ausfädeln usw. verstanden werden ... In Anlehnung an bestimmte physikalische Bewegungsprozesse wird die Gesamtheit der sich bewegenden Fahrzeugeinheiten oder Elemente auch als **Verkehrsstrom**, die Bewegung selbst als **Verkehrsfluß**, bezeichnet. Diese Bezeichnung verdeutlicht den dynamischen Charakter des Verkehrsablaufs.“

Für eine Regelung des Verkehrsflusses, z. B. durch eine Verkehrsrechnerzentrale, ist es notwendig, durch Verkehrsbeobachtungen Verkehrskenngrößen zu erfassen. Auch um den Verkehrsfluss zu untersuchen und in einer Verkehrs(fluss)simulation nachbilden zu können, ist die Erfassung von Verkehrskenngrößen zwingend notwendig. Dabei unterscheidet man zwischen mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen. Verkehr kann mikroskopisch mit Kenngrößen für einzelne Fahrzeuge (Abschnitt 2.1) charakterisiert werden sowie makroskopisch, indem die mikroskopischen Kenngrößen räumlich, zeitlich oder räumlich-zeitlich aggregiert werden [Tra06] (Abschnitt 2.2).

Die mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen des Verkehrs können einerseits lokal an einem Ort an einem Messquerschnitt innerhalb eines begrenzten Zeitabschnitts, andererseits als eine Momentaufnahme zu einem Zeitpunkt innerhalb eines begrenzten Streckenabschnitts ermittelt werden. Eine Übersicht der mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen mit einer Unterscheidung nach lokalen und momentanen Kenngrößen zeigt Abbildung 2.1.

Da momentane Beobachtungen in der Praxis sehr aufwendig sind, werden meist lokale Kenngrößen ermittelt und in momentane Kenngrößen umgerechnet. Die Umrechnung von lokalen und momentanen Kenngrößen wird in Abschnitt 2.3 beschrieben.

Bei der Darstellung in dieser Arbeit wird die einheitliche Benennung „Kenngröße“ und synonym „Verkehrskenngröße“ verwendet. In Abschnitt 2.3 wird zusätzlich die Benennung „Messgröße“ eingeführt, wobei aus den „Messgrößen“ die „Kenngrößen“ berechnet werden. Diese Benennung entspricht der allgemein üblichen Unterscheidung [Mar99]. Für eine detaillierte Darstellung der verwendeten physikalischen Prinzipien und der Messverfahren sowohl fahrzeugseitiger als auch infrastrukturseitiger Sensoren sei auf [Pol09], [Sch07] verwiesen.

Abschließend folgt in Abschnitt 2.4 die Beschreibung des Fundamentaldiagramms des Verkehrs. Für eine weitere thematische Auseinandersetzung mit den Inhalten dieses Kapitels sei auf [GH10, Höf06, Dag97] verwiesen.

2.1 Mikroskopische Verkehrskenngrößen

Mikroskopische Kenngrößen beschreiben die „Bewegungsabläufe einzelner Fahrzeuge“ [Höf06], es geht also um die „[Betrachtung des Verkehrsablaufs mit] Kenngrößen für einzelne Fahrzeuge“ [Küh05]. Dabei „[dienen] mikroskopische Kenngrößen der Beurteilung einzelner Situationen und Fahrmanöver.“ [Tra06]

Die Kenngrößen eines Einzelfahrzeugs sind mindestens dessen Position auf der Straße, die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie -beschleunigung.

Die Geschwindigkeit muss in Abhängigkeit der Art der Messung nach momentaner Geschwindigkeit und lokaler Geschwindigkeit unterschieden werden, wobei die Unterscheidung der beiden Kenngrößen erst bei der Mittelwertbildung zum Tragen kommt (vgl. Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3).

Beide Geschwindigkeiten können nicht direkt durch Messungen ermittelt werden, sodass quasi-momentane bzw. quasi-lokale Messungen durchgeführt werden müssen.

Dabei wird zur Bestimmung der *momentanen Geschwindigkeit* v_m für einen festen (möglichst kurzen (und damit quasi-momentanen)) Zeitabschnitt $\Delta\tau$ der zurückgelegte Weg s_m eines Fahrzeugs ermittelt (z. B. angewendet bei der Messung durch Luftbildauswertung).

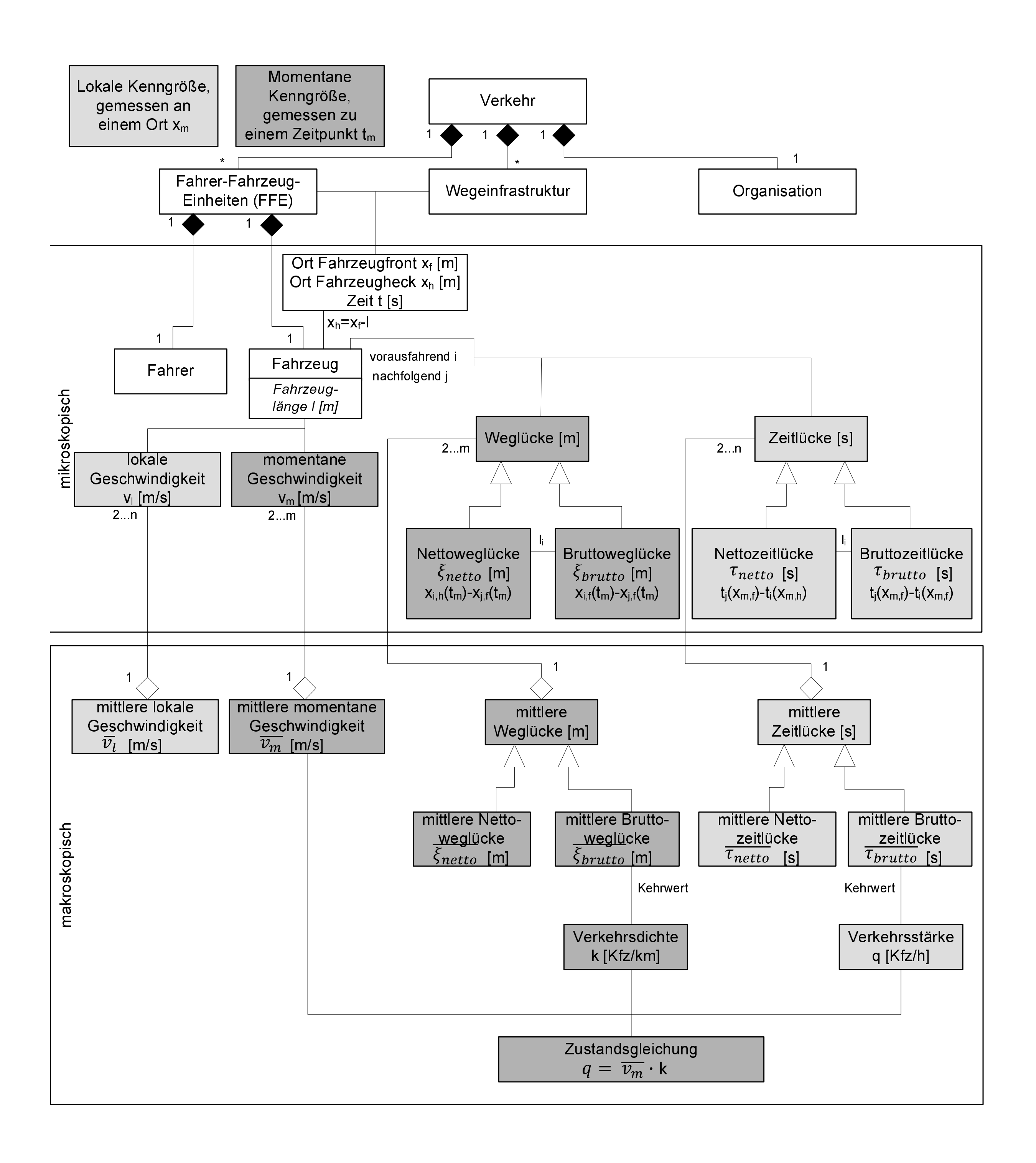


Abbildung 2.1: Übersicht über Verkehrskenngrößen und deren Beziehungen zueinander

Das Verhältnis des zurückgelegten Wegs s_m zur Zeitabschnittsdauer $\Delta\tau$ ergibt die momentane Geschwindigkeit (Gleichung (2.1)).

$$v_m = \frac{s_m}{\Delta\tau} \tag{2.1}$$

mit

v_m	momentane Geschwindigkeit (m/s)
s_m	gemessener zurückgelegter Weg (m)
$\Delta\tau$	(kurzer) Zeitabschnitt (quasi-momentan) (s)

Für die Bestimmung der *lokalen Geschwindigkeit* v_l eines Fahrzeugs wird die Überfahrzeit t_l über einen festen (möglichst kurzen (und damit quasi-lokal)) Streckenabschnitt $\Delta\sigma$ bestimmt (z. B. angewendet bei der Messung mit Induktionsschleifen) und aus dem Verhältnis von Abschnittslänge $\Delta\sigma$ zur Überfahrzeit t_l die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt (Gleichung (2.2)).

$$v_l = \frac{\Delta\sigma}{t_l} \tag{2.2}$$

mit

v_l	lokale Geschwindigkeit (m/s)
$\Delta\sigma$	(kurzer) Streckenabschnitt (quasi-lokal) (m)
t_l	gemessene Überfahrzeit (s)

Aus der gemessenen Geschwindigkeit kann über die zeitliche Ableitung die *Beschleunigung* a des Fahrzeugs berechnet werden (Gleichung (2.3)):

$$a = \frac{dv}{dt} \tag{2.3}$$

mit

a	Fahrzeugbeschleunigung (m/s^2)

Bei der Betrachtung zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge gehört der Abstand zwischen den Fahrzeugen ebenfalls zu den mikroskopischen Verkehrskenngrößen. Der Abstand kann dabei als *Weglücke* (Space Headway) oder als *Zeitlücke* (Time Headway) angegeben werden.

Die momentane Kenngröße der *Weglücke* zwischen zwei Fahrzeugen ist der örtliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Wird die Fahrzeuglänge des ersten Fahrzeugs mit eingerechnet, spricht man von *Bruttoweglücke* (siehe Abbildung 2.2), wird die Fahrzeuglänge des ersten Fahrzeugs abgezogen, spricht man von *Nettoweglücke* (siehe Abbildung 2.3). Die Weglücke wird in der Einheit Metern angegeben.

Wird umgangssprachlich vom Abstand zwischen zwei Fahrzeugen gesprochen, ist in der Regel die Nettoweglücke gemeint. Im Rahmen der Arbeit wird daher die umgangssprachliche Benennung „Abstand“ synonym mit „Nettoweglücke“ verwendet, soweit diese Benennung auch im aktuellen Kontext bevorzugt verwendet wird. So enthält z. B. die Spezifikation der in Abschnitt 7.1 beschriebenen Fahrzeugsensorik die Benennung „distance“, die „Nettoweglücke“ meint und in diesem Kontext mit „Abstand“ übersetzt wird.

Die lokale Kenngröße der *Zeitlücke* ist der Unterschied zwischen der Zeit t_1, in der das erste Fahrzeug an einem festen Ort ankommt, und der Zeit t_2, zu der das zweite Fahrzeuge diesen Ort passiert. Wird dabei von Fahrzeugfront zu Fahrzeugfront gemessen, wird die Zeitlücke als *Bruttozeitlücke* bezeichnet (siehe Abbildung 2.2). Wird vom Fahrzeugende des ersten Fahrzeugs zur Fahrzeugfront des zweiten Fahrzeugs gemessen, wird die *Nettozeitlücke* bestimmt (siehe Abbildung 2.3). Die Zeitlücke wird in der Einheit Sekunden angegeben.

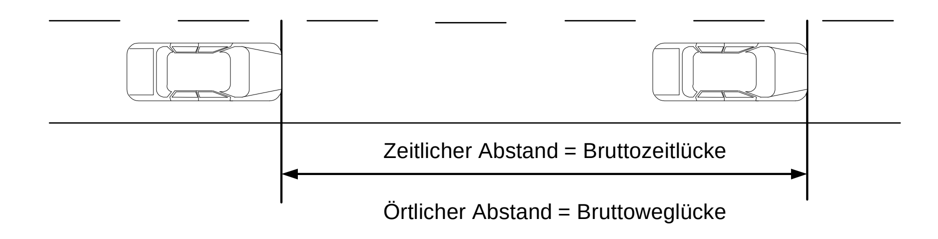


Abbildung 2.2: Bruttozeitlücke und Bruttoweglücke, nach [Sch10b]

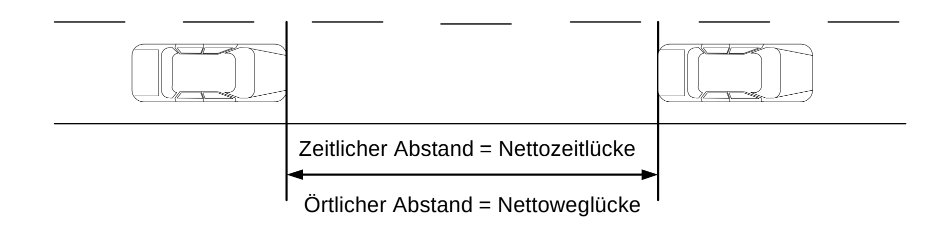


Abbildung 2.3: Nettozeitlücke und Nettoweglücke, nach [Sch10b]

2.2 Makroskopische Verkehrskenngrößen

Die Definition von „makroskopischen Kenngrößen“ weicht im Detaillierungsgrad in unterschiedlichen Veröffentlichungen voneinander ab. So schreibt [Höf06]: „Über eine Auswertung der Bewegungsabläufe ... von Fahrzeugkollektiven (makroskopisch) lassen sich Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsflusses ableiten.“ Der Autor schreibt weiter, dass die empirisch ermittelten Daten (mikroskopische Daten) „durch geeignete Aggregierung bzw. Glättung ... zur Schätzung der makroskopischen Kenngrößen dienen.“ [Küh05] beschreibt makroskopische Kenngrößen als „über einen Zeitraum oder Streckenabschnitt aggregierte Größen“. [Tra06] ergänzt die räumlichzeitliche Aggregation in der Beschreibung: „Die mikroskopischen Kenngrößen können ... zu ... makroskopischen Kenngrößen räumlich, zeitlich oder räumlichzeitlich aggregiert werden.“

Zu den makroskopischen Verkehrskenngrößen gehören insbesondere die Verkehrsdichte, die Verkehrsstärke sowie die mittlere momentane Geschwindigkeit, deren Zusammenhang auch im Fundamentaldiagramm (siehe Abschnitt 2.4) eingeht. Weitere makroskopische Größen sind die mittlere lokale Geschwindigkeit, die mittlere Zeitlücke sowie die mittlere Weglücke.

Für die folgende Darstellung der momentanen und lokalen makroskopischen Kenngrößen ist zu beachten, dass die Anzahl der erfassten Fahrzeuge m bei einer momentanen Messung und die Anzahl n bei einer lokalen Messung in der Regel nicht identisch ist. Dies kann an einem einfachen Beispiel, das im Anhang A beschrieben ist, aufgezeigt werden.

Die *Verkehrsdichte* k ist eine momentane Kenngröße und gibt an, wie viele Fahrzeuge m sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem Streckenabschnitt Δs befinden (Gleichung (2.4), siehe auch Abbildung 2.4). Das Formelzeichen für die Verkehrsdichte wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Neben k findet sich in der Literatur auch ρ, d_{kfz} oder K als Formelzeichen für die Verkehrsdichte.

$$k = \frac{m}{\Delta s} \tag{2.4}$$

mit

k	Verkehrsdichte (*Kfz/km*)
m	Anzahl der Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt
Δs	Streckenabschnitt (*km*)

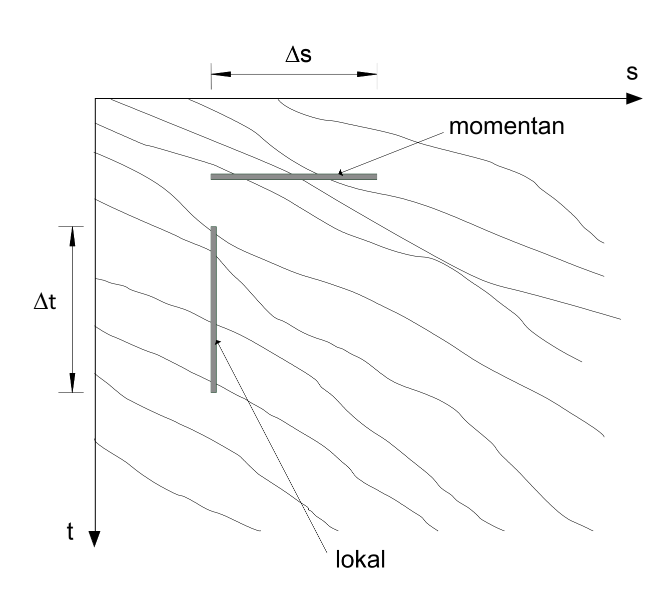


Abbildung 2.4: Darstellung der lokalen Messung an einem Messquerschnitt und der momentanen Messung zu einem Zeitpunkt anhand von Fahrzeugtrajektorien im s-t Diagramm

Die *Verkehrsstärke* q ist eine lokale Kenngröße und gibt die Anzahl der Verkehrsteilnehmer n an einem Querschnitt je Zeiteinheit Δt wieder (Gleichung (2.5), siehe auch Abbildung 2.4). Die Anzahl der Fahrzeuge n bezieht sich häufig auf eine Stunde, in Abhängigkeit des Anwendungsfalls sind auch eine, fünf oder 15 Minuten üblich.

$$q = \frac{n}{\Delta t} \tag{2.5}$$

mit

q Verkehrsstärke (Kfz/h)
n Anzahl der Fahrzeuge an einem Querschnitt
Δt Zeitabschnitt (h)

Die *mittlere momentane Geschwindigkeit* $\bar{v}_m$ wird oft auch als Streckenmittel der Fahrzeuggeschwindigkeiten bezeichnet. Bestimmt werden kann die mittlere momentane Geschwindigkeit aus dem Verhältnis der Summe der Wegabschnitte s_m zur Zeitabschnittsdauer $\Delta\tau$ und Anzahl der beobachteten Fahrzeuge m (Gleichung (2.6), vgl. auch Gleichung (2.1)).

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{j=1}^{m} s_{m(j)}}{m \cdot \Delta\tau} \tag{2.6}$$

In Abbildung 2.5 ist die Bestimmung der mittleren momentanen Geschwindigkeit für m=3 Fahrzeuge (j=1,2,3) dargestellt. Die drei Fahrzeuge legen unterschiedliche Wege s_{m1}, s_{m2} und s_{m3} in der Zeitabschnittsdauer $\Delta\tau$ zurück.

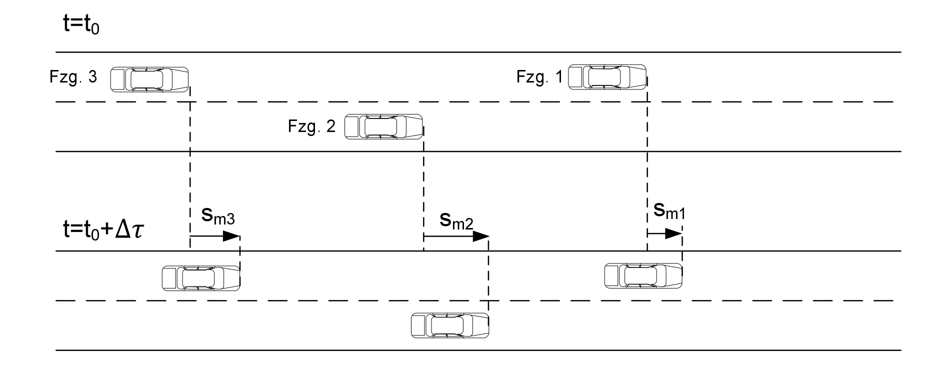


Abbildung 2.5: Darstellung der in der Zeitabschnittsdauer $\Delta\tau$ zurückgelegten Wegabschnitte $s_{m(j)}$ zur Ermittlung der mittleren momentanen Geschwindigkeit

Dies ist gleich dem Mittelwert der momentanen Einzelgeschwindigkeiten $v_{m(j)}$ der Fahrzeuge $j = 1 \ldots m$ (Gleichung (2.7)):

$$\bar{v}_m = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{m} v_{m(j)} \tag{2.7}$$

mit

$\bar{v}_m$ mittlere momentane Geschwindigkeit (m/s)
$s_{m(j)}$ gemessener zurückgelegter Weg des Fahrzeugs j (m)
$v_{m(j)}$ momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs j (m/s)

Die *mittlere lokale Geschwindigkeit* $\bar{v}_l$ wird auch als zeitliches Mittel der Fahrzeuggeschwindigkeiten bezeichnet. Bestimmt werden kann die mittlere lokale Geschwindigkeit aus dem Verhältnis der Abschnittslänge $\Delta\sigma$ zur Summe der Zeiteinheiten t_l und Anzahl der beobachteten Fahrzeuge n (Gleichung (2.8), vgl. auch Gleichung (2.2)):

$$\bar{v}_l = \frac{\Delta\sigma \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{t_{l(i)}}}{n} \tag{2.8}$$

In Abbildung 2.6 ist die Bestimmung der mittleren lokalen Geschwindigkeit für n=3 (i=1,2,3) Fahrzeuge dargestellt. Der Ort der Messung ist in der Abbildung als Messquerschnitt bezeichnet. Die Abbildung zeigt die Bestimmung der Zeiteinheit t_{l1}, die das Fahrzeug 1 für die Abschnittslänge $\Delta\sigma$ benötigt. Für die nachfolgenden Fahrzeuge werden am Messquerschnitt die Zeiteinheiten t_{l2} und t_{l3} bestimmt (in der Abbildung nicht dargestellt).

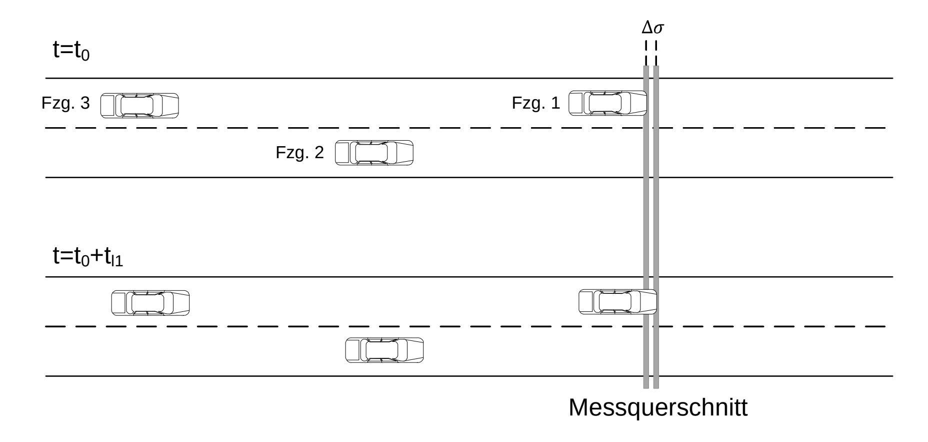


Abbildung 2.6: Darstellung der lokalen Messung zur Ermittlung der mittleren lokalen Geschwindigkeit

Dies ist gleich dem Mittelwert der lokalen Fahrzeuggeschwindigkeiten $v_{l(i)}$ der Fahrzeuge $i = 1 \dots n$ (Gleichung (2.9)):

$$\bar{v}_l = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} v_{l(i)} \tag{2.9}$$

mit

$\bar{v}_l$ mittlere lokale Geschwindigkeit (m/s)
$t_{l(i)}$ gemessene Überfahrzeit des Fahrzeugs i (s)
$v_{l(i)}$ lokale Geschwindigkeit des Fahrzeugs i (m/s)

Die *mittlere Zeitlücke* $\overline{\tau}$ gibt den durchschnittlichen Zeitabstand der Fahrzeuge zueinander in Sekunden an und wird über den arithmetischen Mittelwert der an einem Messquerschnitt gemessenen Einzelzeitlücken gebildet. Dabei wird zwischen der *mittleren Nettozeitlücke* und der *mittleren Bruttozeitlücke* unterschieden, wobei Letztere auch über den Kehrwert der Verkehrsstärke bestimmt werden kann (Gleichung (2.10)):

$$\overline{\tau}_{Brutto} = \frac{1}{q} \tag{2.10}$$

mit

$\overline{\tau}_{Brutto}$ mittlere Bruttozeitlücke (s/Kfz)

Die *mittlere Weglücke* $\overline{\xi}$ gibt den durchschnittlichen Wegabstand der Fahrzeuge zueinander in Metern wieder und wird über den arithmetischen Mittelwert der während einer Momentaufnahme über einen Streckenabschnitt bestimmten Einzelweglücken gebildet. Es wird zwischen der *mittleren Nettoweglücke* und der *mittleren Bruttoweglücke* unterschieden, wobei Letztere auch über den Kehrwert der Verkehrsdichte bestimmt werden kann (Gleichung (2.11)):

$$\overline{\xi}_{Brutto} = \frac{1}{k} \tag{2.11}$$

mit

$\overline{\xi}_{Brutto}$ mittlere Bruttoweglücke (m/Kfz)

2.3 Umrechnung lokaler und momentaner Kenngrößen

In der Praxis werden aufgrund des Aufwandes zur Bestimmung von momentanen Messgrößen meist lokale Messgrößen erfasst und in momentane Kenngrößen umgerechnet. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten zur Berechnung der makroskopischen Verkehrskenngrößen aus momentanen und lokalen Messungen [Höf06], [SL97], [Dag97].

Tabelle 2.1: Berechnung makroskopischer Verkehrskenngrößen aus momentanen und lokalen Messungen

Verkehrskenngröße	momentane Messung	lokale Messung
Verkehrsdichte (Kfz/km)	$k = \frac{m}{\Delta s}$	$k = \frac{1}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{v_{l(i)}}$
Verkehrsstärke (Kfz/h)	$q = \frac{1}{\Delta s} \cdot \sum_{j=1}^{m} v_{m(j)}$	$q = \frac{n}{\Delta t}$
mittlere lokale Geschw. (m/s)	$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{\sigma^2_{v_m}}{\bar{v}_m}$ $\sigma^2_{v_m} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left(v_{m(j)} - \bar{v}_m\right)^2$	$\bar{v}_l = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} v_{l(i)}$
mittlere momentane Geschw. (m/s)	$\bar{v}_m = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{m} v_j$	$\bar{v}_m = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{v_{l(i)}}}$

Ist eine momentane Messung der *Verkehrsdichte*, z. B. durch eine Auswertung von Luftbildaufnahmen, nach Gleichung (2.4) nicht möglich, kann die Verkehrsdichte mit Gleichung (2.12) aus den Messwerten einer lokalen Messung bestimmt werden.

$$k = \frac{1}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{v_{l(i)}} \tag{2.12}$$

Kann die *Verkehrsstärke* nicht lokal an einem Messquerschnitt innerhalb eines Zeitabschnittes Δt, z. B. über Induktionsschleifen, anhand der Gleichung (2.5) bestimmt werden, ist eine alternative Bestimmung mit den Messwerten aus einer momentanen Messung mit Gleichung (2.13) möglich.

$$q = \frac{1}{\Delta s} \cdot \sum_{j=1}^{m} v_{m(j)} \tag{2.13}$$

Die Ermittlung der *mittleren lokalen Geschwindigkeit* aus der momentanen Geschwindigkeit ist mit folgender Umrechnung möglich (Gleichung (2.14)):

$$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{\sigma^2_{v_m}}{\bar{v}_m} \tag{2.14}$$

Hierzu muss die Varianz der momentanen Geschwindigkeit der Fahrzeuge bekannt sein (Gleichung (2.15)):

$$\sigma^2_{v_m} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^{m} \left(v_{m(j)} - \bar{v}_m\right)^2 \tag{2.15}$$

Die Ermittlung der *mittleren momentanen Geschwindigkeit* aus der lokalen Geschwindigkeit ist mit folgender Umrechnung möglich (Gleichung (2.16)):

$$\bar{v}_m = \frac{n}{\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{1}{v_{l(i)}}} \tag{2.16}$$

Aus Gleichung (2.14) ist zu erkennen, dass die mittlere momentane Geschwindigkeit $\bar{v}_m$ stets kleiner ist als die mittlere lokale Geschwindigkeit $\bar{v}_l$ (Gleichung (2.17)). Ein Beispiel, das die Unterschiede aufzeigt, enthält der Anhang A. Nur für den Fall, dass die Standardabweichung zu Null wird (z. B. da alle betrachteten Fahrzeuge mit der gleichen Geschwindigkeit fahren), sind die beiden Werte gleich groß.

$$\bar{v}_m \leq \bar{v}_l \tag{2.17}$$

2.4 Grafische Darstellung im Fundamentaldiagramm

Die drei Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und die mittlere momentane Geschwindigkeit stehen in der Zustandsgleichung für stationären und homogenen Verkehrsfluss in Korrelation zueinander:

$$q = \bar{v}_m \cdot k \tag{2.18}$$

Es ist zu beachten, dass die Verkehrsstärke q eine lokale Größe ist, die Verkehrsdichte k hingegen eine momentane Größe. Nur für den Fall stationären Verkehrsflusses können die beiden Größen über die mittlere momentane Geschwindigkeit verknüpft werden (Gleichung (2.18)). Die mathematisch korrekte Verknüpfung der Größen ist über eine zeitlich-räumliche Betrachtungsweise möglich [SL97, Höf06].

Die am häufigsten verwendete grafische Darstellung des *Fundamentaldiagramms* ist das Verhältnis der Verkehrsstärke zur Verkehrsdichte. Das in Abbildung 2.7 zu sehende Fundamentaldiagramm zeigt einen typischen, idealisierten Verlauf.Vom Ursprung aus steigt mit zunehmender Verkehrsdichte k die Verkehrsstärke q. Beim Schwellenwert k_{krit} erreicht die Verkehrsstärke eine Obergrenze q_{max}. Steigt die Verkehrsdichte k weiter an, wird die Verkehrslage instabil, da sich zu viele Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt befinden und die Verkehrsstärke q sinkt. Die mittlere momentane Geschwindigkeit v_m kann als Steigung der Geraden durch das Verhältnis der aktuellen Verkehrsstärke q zur Verkehrsdichte k bestimmt werden. Folgende Randbedingungen können identifiziert werden:

- v_{max} entspricht der Wunschgeschwindigkeit im freien Verkehr.

- Die maximale Verkehrsstärke q_{max} entsteht bei der kritischen Geschwindigkeit v_{krit} und der kritischen Verkehrsdichte k_{krit}.
- Die maximale Verkehrsdichte k_{max} entsteht bei stehendem Verkehr ($q = 0$).

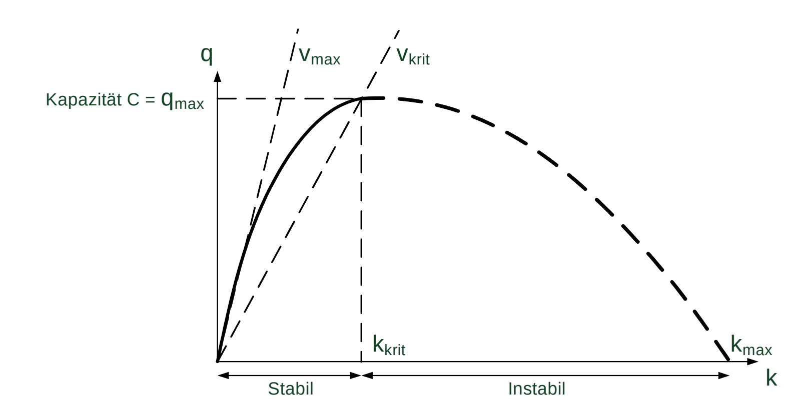


Abbildung 2.7: Prinzipdarstellung eines Fundamentaldiagramms, nach [Sch10b], [FIH06]

In empirischen Messdaten kann häufig bis zur kritischen Dichte eine sehr gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Modell festgestellt werden. Oberhalb dieses Wertes nimmt die Abweichung zwischen theoretischem Modell und empirischen Daten hingegen zu [Höf06], [Ker04], [Pap04], [Hel97].

Im Rahmen der Arbeit wurden Messdaten der Verkehrsrechnerzentrale Hannover verwendet, die entlang der Autobahn A2 in der Region Hannover mit stationärer Sensorik erhoben wurden. Eine ausführliche Darstellung der verwendeten Messdaten ist in Abschnitt 7.5 gegeben. Die Erstellung der grafischen q-k-Beziehung aus diesen empirischen Messdaten gestaltete sich schwieriger, als sich in einer ersten Annahme vermuten ließe. Der Messdatensatz eines Messquerschnitts enthält in Übereinstimmung mit [Mar99] nach Fahrstreifen separiert die in Tabelle 2.2 aufgeführten im 1-Minuten-Intervall aggregierten Kenngrößen.

Tabelle 2.2: Erhobene Kenngrößen der Messquerschnitte entlang der Autobahn A2

Kenngröße	Kurzzeichen	Einheit
Verkehrsstärke Kfz	q-Kfz	Fzg./Min.
Verkehrsstärke Lkw	q-Lkw	Fzg./Min.
mittlere lokale Geschwindigkeit Pkw	v-Pkw	km/h
mittlere lokale Geschwindigkeit Lkw	v-Lkw	km/h
mittlere Nettozeitlücke	t-Netto	s
Belegung	b	%
Standardabweichung der Kfz-Geschwindigkeit	s	km/h
geglättete mittlere lokale Geschwindigkeit	v-Kfz-Mittel	km/h

Diese Kenngrößen sind für die Erstellung eines Fundamentaldiagramms nicht ausreichend. Zur Darstellung der q-k-Beziehung liegt in den Messdaten nur die Verkehrsstärke q

vor, sodass die Verkehrsdichte k aus den vorliegenden Daten berechnet werden muss. Bei Kenntnis der mittleren momentanen Geschwindigkeit $\bar{v}_m$ und der Verkehrsstärke q kann k über die Gleichung (2.19), die sich direkt aus Gleichung (2.18) ergibt, berechnet werden.

$$k = \frac{q}{\bar{v}_m} \tag{2.19}$$

Da die Messung aber lokal vorgenommen wurde, liegt in den Messdaten nur die mittlere lokale Geschwindigkeit vor. Grundsätzlich lässt sich die mittlere momentane Geschwindigkeit aus lokalen Messungen bestimmen, hierzu müssten aber nach Tabelle 2.1 die Einzelgeschwindigkeiten der Fahrzeuge aus der lokalen Messung vorliegen. Eine alternative Berechnung der Verkehrsdichte wäre über die Bruttoweglücke nach Gleichung (2.11) möglich, die aber in den lokal erfassten Messdaten ebenfalls nicht vorhanden ist. Daher wurde für die Erstellung der zwei Fundamentaldiagramme in Abbildung 2.8 ersatzweise die mittlere lokale Geschwindigkeit der Messdaten eines Messquerschnitts der A2 aus der Region Hannover zweier Tage verwendet. Da die mittlere lokale Geschwindigkeit $\bar{v}_l$ stets größer als die momentane Geschwindigkeit $\bar{v}_m$ ist (siehe Gleichung (2.17)), kann aus Gleichung (2.19) erkannt werden, dass die aus der mittleren lokalen Geschwindigkeit bestimmte Verkehrsdichte stets kleiner ist als die aus der mittleren momentanen Geschwindigkeit bestimmte Verkehrsdichte.

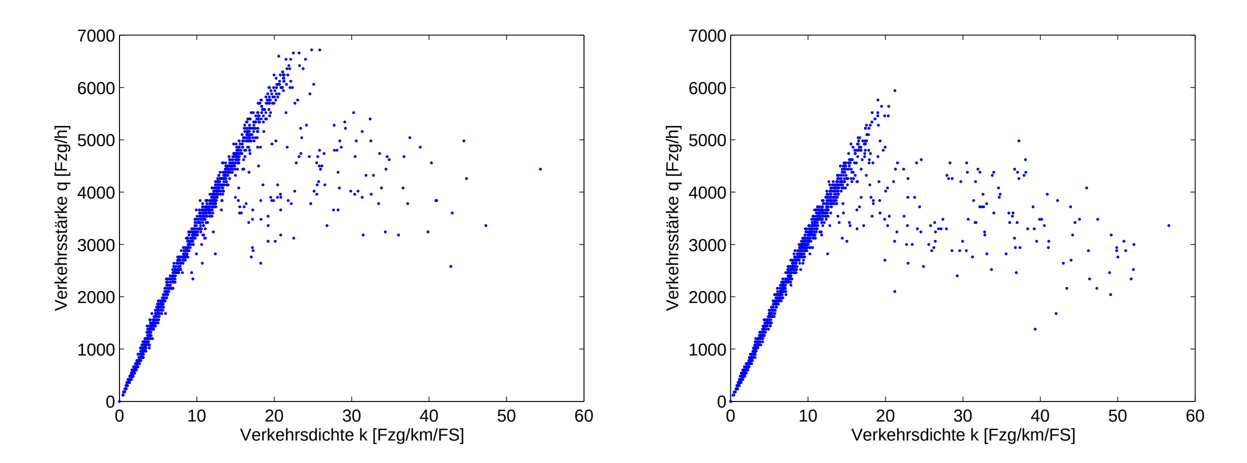


Abbildung 2.8: Beispiele für Fundamentaldiagramme einer dreistreifigen Autobahn für zwei unterschiedliche Tage (FS=Fahrstreifen)

Im Folgenden soll das Ziel der Verkehrsoptimierung anhand der Darstellung im Fundamentaldiagramm erläutert werden. Bei einem Ausbau der Verkehrsinfrastruktur einer zweistreifigen Autobahn auf drei Fahrstreifen wird die maximal mögliche Verkehrsdichte k_{max} größer, da theoretisch mehr Fahrzeuge auf den betrachteten Streckenabschnitt passen. Bei Beibehaltung der Parabelform erhöht sich durch den Ausbau auch die maximale Verkehrsstärke q_{max} und die kritische Verkehrsdichte k_{krit} verschiebt sich zu größeren Werten.

Bei der Verkehrsoptimierung durch eine Verkehrsrechnerzentrale oder durch Assistenzsysteme auf dem Einzelfahrzeug bleibt die maximale Verkehrsdichte k_{max} nahezu unverändert, da dieser Wert durch die Anzahl der Fahrstreifen, der Länge der Fahrzeuge und dem

Abstand der Fahrzeuge beim Stillstand bestimmt wird. Ziel einer Verkehrsoptimierung muss es sein, die Werte der maximalen Verkehrsstärke q_{max} sowie kritischer Verkehrsdichte k_{krit} zu erhöhen, um mehr Fahrzeuge eines Streckenabschnitts aus diesem Streckenabschnitt in gleicher Zeit abfliessen zu lassen. Gleichzeitig sollte der Bereich bis zur kritischen Verkehrsdichte k_{krit} nicht negativ beeinflusst werden.

In den beiden Beispielen in Abbildung 2.8 ist zu erkennen, dass die Werte von Verkehrsstärke über Verkehrsdichte bis ca. 20 Fzg/km/Fahrstreifen eine Gerade bilden. Bei Verkehrsdichten über 20 Fzg/km/Fahrstreifen nimmt die Streuung der Werte der Verkehrsstärke stark zu. Bei der zentralen Optimierung durch eine Verkehrsrechnerzentrale wird durch Geschwindigkeitsbeschränkungen versucht eine Harmonisierung des Verkehrsablaufs zu erreichen und diese Streuung zu reduzieren. In Kapitel 1 wurde beschrieben, dass mit Verkehrsrechnerzentralen zurzeit der Verkehr nicht entsprechend seiner Dynamik erfasst und beeinflusst werden kann. Aus diesem Grund müssen diese Geschwindigkeitsbeschränkungen stets länger andauernd und für größere Streckenabschnitte geschaltet werden. Hieraus ergeben sich teilweise bereits unterhalb der kritischen Verkehrsdichte k_{krit} unnötige Restriktionen für die Fahrzeugführer. Vielversprechend ist daher der Ansatz des Verkehrsassistenzsystems, dass eine lokal und zeitlich begrenzte Harmonisierung des Verkehrsablaufs ermöglicht und unnötige Restriktionen damit vermeidet.

Bei gleichbleibender maximaler Verkehrsdichte k_{max} ändert sich durch das Verkehrsassistenzsystem die Form des Fundamentaldiagramms. Eine mögliche Verschiebung von q_{max} zu q_{max_opt} und k_{krit} zu k_{krit_opt} und die sich daraus ergebene Form des Fundamentaldiagramms sind in Abbildung 2.9 dargestellt. Das Ziel der Optimierung ist die in der Abbildung dargestellte Kapazitätssteigerung. Bis zur kritischen Verkehrsdichte k_{krit} ist keine Beeinflussung notwendig. Die Abnahme der mittleren momentanen Geschwindigkeit bei weiterer Zunahme der Verkehrsdichte verlangsamt sich durch das VAS bis zum Erreichen der neuen kritischen Verkehrsdichte k_{krit_opt}.

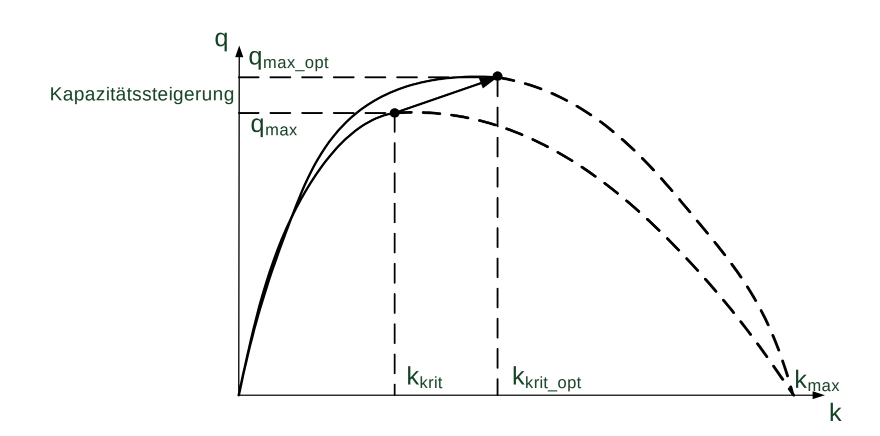


Abbildung 2.9: Fundamentaldiagramm zur Darstellung des Ziels der Verkehrsoptimierung

3 Anforderungen an die Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen

In diesem Kapitel wird der Aufbau sowie die Funktionsweise eines VAS dargestellt. Die bisher vorgestellten Ansätze für VAS erweitern die Funktionalität der bereits im Markt vorhandenen Adaptive Cruise Control (ACC) Systeme (auch unter adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung bekannt), deren Funktionsweise in Abschnitt 3.1 erklärt wird. Die Erweiterung zum VAS wird anschließend in Abschnitt 3.2 dargestellt, um in Abschnitt 3.3 die Anforderungen an eine Untersuchung eines VAS zu ermitteln.

3.1 Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung (ACC)

Das ACC-System als Komfortfahrerassistenzsystem übernimmt eine Teilfunktion der Längsführung eines Fahrzeugs [Rob02] und ist eine Erweiterung des konventionellen Cruise Control Systems. Die Erweiterung ergibt sich dadurch, dass das System nicht nur eine konstante Geschwindigkeit einhalten kann, sondern in Abhängigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs auch eine konstante Nettozeitlücke (vgl. Abschnitt 2.1). Hierzu ist das Fahrzeug mit einem Automatikgetriebe und einem Sensor, meist auf Radar- oder Lidartechnologie basierend, zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug ausgestattet. Ein typischer zeitlicher Ablauf der Funktionsweise des ACC-Systems ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

- Ist innerhalb der Sensorreichweite von ca. 150 m bis 200 m vor dem ACC-Fahrzeug kein vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden, beschleunigt das System auf eine vom Fahrer eingestellte Geschwindigkeit und hält anschließend diese Geschwindigkeit.

- Im Fall, dass das ACC-Fahrzeug sich einem langsameren Fahrzeug nähert, verringert das System die Fahrzeuggeschwindigkeit.

- Das ACC-Fahrzeug folgt anschließend dem vorausfahrenden Fahrzeug in einer konstanten Nettozeitlücke. Hierzu passt das ACC-Fahrzeug kontinuierlich seine Geschwindigkeit dem vorausfahrenden Fahrzeug durch Beschleunigen und Verzögern unter Einhaltung vorgegebener Systemgrenzen an. Die Überschreitung der Systemgrenzen tritt insbesondere bei starken Verzögerungen des vorausfahrenden Fahrzeugs ein, sodass der Fahrer in diesem Fall die Längsführung des Fahrzeugs übernehmen muss.

- Verlässt das vorausfahrende Fahrzeug den eigenen Fahrstreifen oder befindet sich nicht mehr in Sensorreichweite, beschleunigt das ACC-Fahrzeug wieder auf die eingestellte Geschwindigkeit.

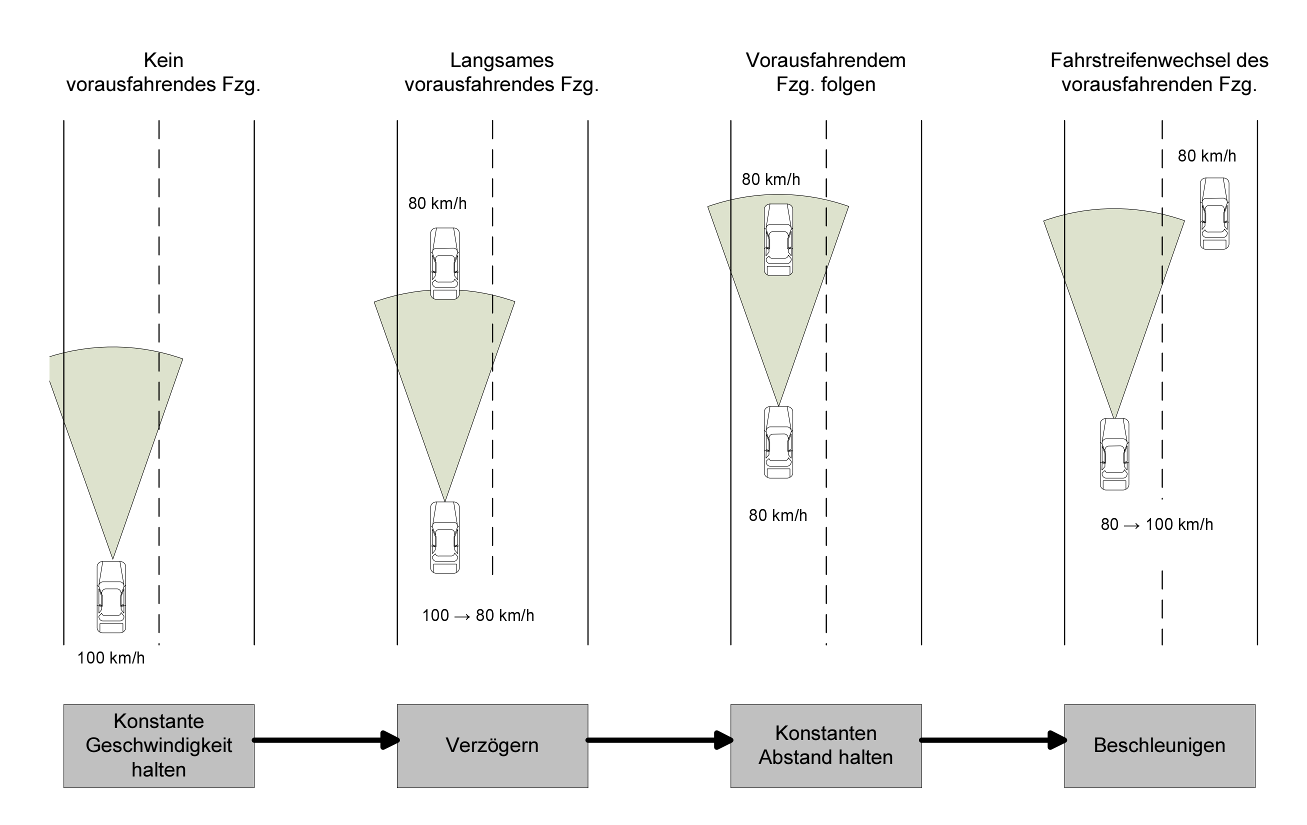


Abbildung 3.1: Funktionsweise Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung (ACC)

Der Haupteinsatzbereich von ACC-Systemen sind Fahrten auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstraßen. Nach [Rob02] ist das System insbesondere für „geringe bis höhere Verkehrsdichten" ausgelegt, und der „Einsatz bei Stau und in der Stadt bleibt noch zukünftigen Systemgenerationen vorbehalten." Diese Aussage wird durch die Ergebnisse anderer Forschungsarbeiten bestätigt. Der Autor von [Fil02] führte Versuche mit 29 Probanden durch und kommt zum Ergebnis: „Hinsichtlich der Zeitlücke können die Einstellungen von ACC das Fahrerverhalten lediglich bei kleinen Verkehrsdichten abbilden. . . . Das dürfte die Fahrer auf Dauer dazu auffordern, gerade bei stärkerem Verkehr . . . das ACC zu übersteuern oder gar auszuschalten." Auch die Autoren von [MMB01a] beschreiben, dass die Ergebnisse eines Feldtests in den USA erwarten lassen, dass der Fahrer das ACC-System nicht in „dense traffic situations" einsetzen wird.

Weitere Details zu ACC-Systemen, z. B. zu den Systemgrenzen, wie die Werte für die maximal zulässige Beschleunigung und Verzögerung, sind in der Norm ISO15622 [ISO02] beschrieben.

3.2 Vom ACC-System zum Verkehrsassistenzsystem

Im vorangegangenen Abschnitt wurde beschrieben, dass die zurzeit auf dem Markt befindlichen ACC-Systeme nicht dafür ausgelegt sind, bei hohen Verkehrsdichten verwendet zu werden. Die Zielsetzung bei der Entwicklung dieser Systeme war eine Entlastung des Fahrers und eine Erhöhung des Fahrkomforts. Diese Systeme wurden nicht mit dem Ziel einer Verkehrsoptimierung entworfen. Die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Ansätze erweitern die Funktionalität eines herkömmlichen ACC-Systems, um durch gezielte Änderungen

der ACC-Reglerparameter während der Fahrt eine Verkehrsoptimierung insbesondere bei hohen Verkehrsdichten zu erzielen.

Eine mögliche grundlegende Systemstruktur eines VAS ist in Abbildung 3.2 gezeigt. Benötigt werden wie beim herkömmlichen System Sensoren, die den Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug bestimmen. Abweichend vom herkömmlichen ACC-System werden die ACC-Reglerparameter, die in die Regelung der Längsdynamik eingehen, nicht nur durch den gemessenen Abstand, der Relativgeschwindigkeit sowie den Benutzereinstellungen, sondern auch durch die aktuelle Fahrsituation beeinflusst. Zu dieser Fahrsituation gehört neben der Straßentopologie und der Beschilderung, die beide z. B. aus einer digitalen Karte entnommen werden können, insbesondere der Verkehrszustand. Um den Verkehrszustand zu erkennen, werden die Sensoren des Fahrzeugs sowie ggf. eine Kommunikationseinheit zur Kommunikation mit anderen Fahrzeugen oder einer Infrastruktur verwendet. Ansätze zur Erkennung des Verkehrszustands auf dem Einzelfahrzeug werden in [Kes08], [KLS07], [VSKL+07], [KR02], [Ker02a], [Ker02b] vorgestellt.

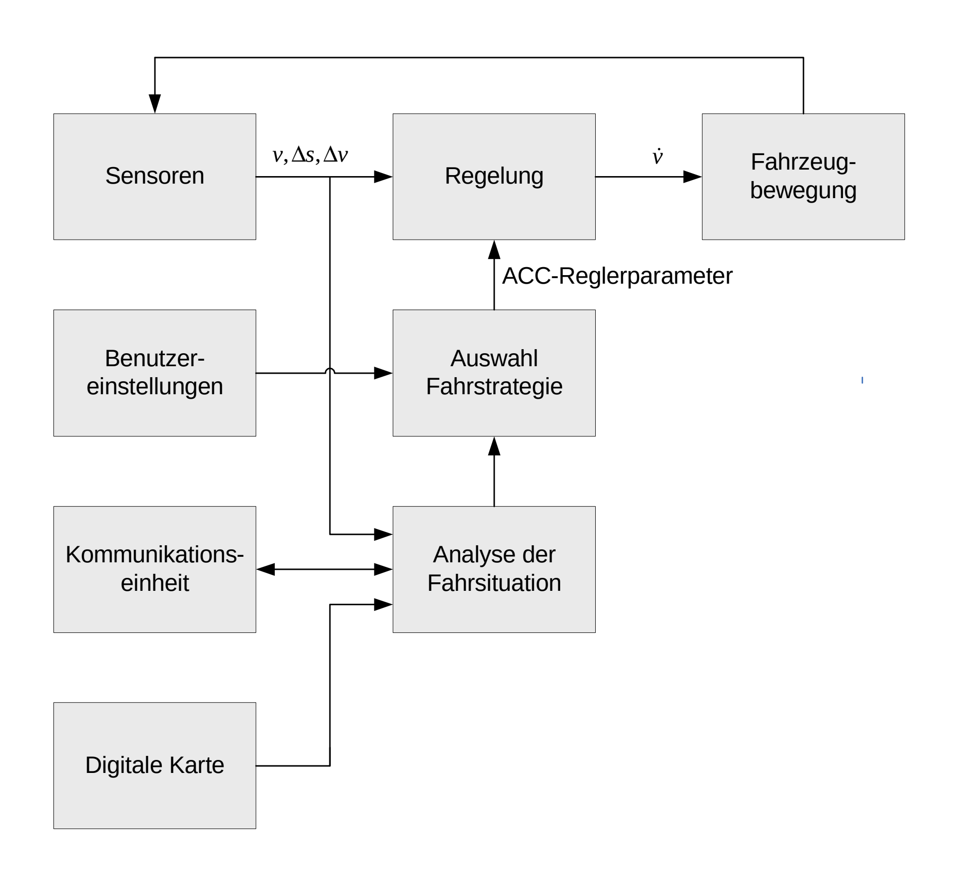


Abbildung 3.2: Systemstruktur eines Verkehrsassistenzsystems

Eine Assistenz des Fahrers, die über eine Veränderung der Längsdynamik zur Optimierung des Verkehrsflusses hinaus geht, ist ebenfalls denkbar. Durch Fahrstreifenempfehlungen oder sogar automatische Fahrstreifenwechsel sind ggf. weitere Optimierungspotenziale zu erschließen. Einen Ansatz zur fahrstreifenübergreifenden Optimierung durch Zusammenschluss mehrerer Fahrzeuge zu dynamischen Fahrzeugkolonnen wird in [HLS09] vorgestellt.

3.3 Anforderungen an die Untersuchung von VAS

Die Untersuchung des VAS ist so zu gestalten, dass es möglich ist, die Auswirkungen bei unterschiedlichen Ausstattungsgraden der auf dem betrachteten Streckenabschnitt befindlichen Fahrzeuge zu untersuchen (siehe Abbildung 3.3). Im Idealfall besteht die Möglichkeit, einen Ausstattungsgrad zwischen 0 % und 100 % zu berücksichtigen. Damit ist es möglich zu bestimmen, wie viel Prozent der auf einem Streckenabschnitt befindlichen Fahrzeuge mindestens ausgestattet sein muss, um eine verkehrliche Wirkung auf dem betrachteten Streckenabschnitt zu erzielen, sowie die Entwicklung der verkehrlichen Wirkung bei weiter steigenden Ausstattungsgraden.

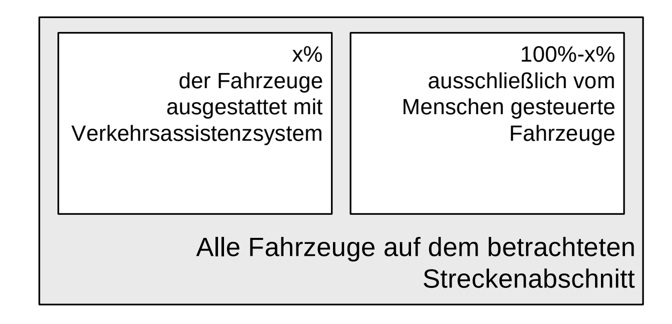


Abbildung 3.3: Ausstattungsgrad x der Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt

Um die Auswirkung dieses Systems mithilfe ausgestatteter Versuchsfahrzeuge im Rahmen von Realfahrten auf Autobahnen zu untersuchen, wären selbst bei einem geringen Ausstattungsgrad von 10 % bei hohem Verkehrsaufkommen mehrere Hundert Versuchsfahrzeuge notwendig. Neben dem enormen Kostenaufwand für die Ausstattung und die Durchführung wäre allein durch die vielen zusätzlichen Fahrzeuge auf der Strecke eine Beeinflussung im Vergleich zu anderen Tagen gegeben.

In Verkehrssimulationen können hingegen die Auswirkungen bei beliebigem Ausstattungsgrad untersucht werden, ohne dabei durch den Aufwand zur Ausstattung realer Fahrzeuge begrenzt zu sein. Die Simulation ermöglicht neben der Auswirkungsanalyse bei unterschiedlichen Ausstattungsgraden auch die Optimierung des Systems, indem Verkehrsabläufe reproduzierbar mit unterschiedlichen Reglereinstellungen simuliert werden können. Ein weiterer Vorteil der Simulation ist, dass die statischen und dynamischen Eigenschaften aller Fahrzeuge und Streckenabschnitte nahezu unbegrenzt beobachtet werden können.

Zur Ermittlung der Anforderungen an die simulative Untersuchung von VAS wird in diesem Abschnitt das Modellkonzept des Systems als theoretische Basis verwendet [Sch99]. Auf der Grundlage des generischen Systemmodells ist es möglich, das makroskopische Verkehrsverhalten aus dem Zusammenwirken der individuellen Einzelsysteme heraus zu verstehen. Systeme bestehen aus einer Menge von Teilen, die ihrerseits wieder in eine Anzahl in wechselseitiger Beziehung stehender Unterteile zerlegt werden können. Auch diese Untersysteme können eine gewisse Komplexität aufweisen, sodass ausgehend von einem Bezugssystem eine beliebige Anzahl von Ebenen, in der jedes System nur gegenüber einem einzigen anderen als Untersystem bezeichnet werden kann, entsteht. Im Detail betrachtet

weist ein System einen gewissen Grad an Komplexität im Sinne allgemeiner Systemeigenschaften auf. Auf jeder hierarchischen Betrachtungsebene eines Systems können diese nach [Sch99] durch die zentralen Eigenschaften Zustand, Struktur, Funktion und Verhalten beschrieben werden, die untereinander vielfältige Beziehungen aufweisen.

Sobald sich ein offenes und komplexes System durch Kombination seiner Teile bildet, entstehen in der Realität durch die jetzt strukturell bedingten Wechselwirkungen neuartige Eigenschaften, die zuvor nicht beobachtbar waren und die auch nicht aus den Eigenschaften ihrer bisher isolierten Teilsysteme heraus erklärbar sind [Sch08], [Ves02]. Dieses Phänomen bezeichnet die Systemtheorie als Emergenz [Ber69], [Wil00].

Ein Verkehrssystem besteht in seiner Grundstruktur aus den vier Konstituenten Verkehrsobjekt, Verkehrsmittel, Verkehrswegeinfrastruktur und Verkehrsorganisation (siehe Abbildung 3.4) [Sch07].

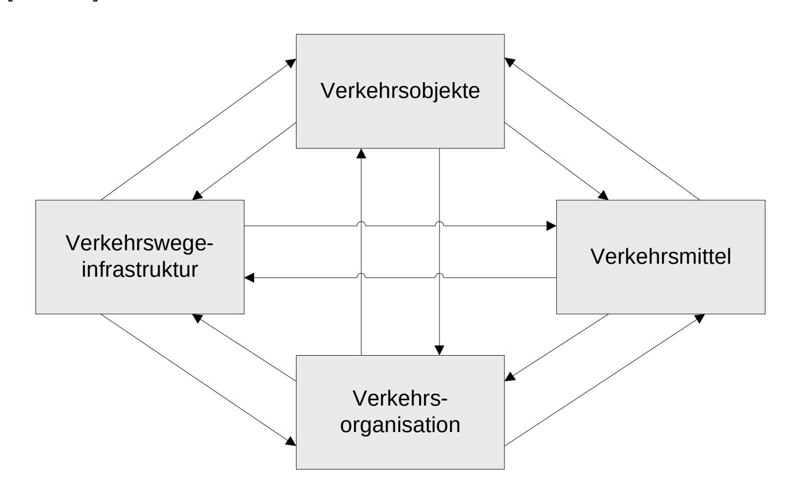


Abbildung 3.4: Konstituenten des Verkehrs, nach [Sch07]

Für den vorliegenden Fall des Straßenverkehrs sind *Verkehrsobjekte* die Verkehrsmittelführer, im Folgenden als Fahrer bezeichnet (unter Vernachlässigung der weiteren Verkehrsobjekte Transportgut oder Fahrgäste). Das Straßennetz bildet die *Verkehrswegeinfrastruktur* und die *Verkehrsmittel* sind z. B. Personenkraftwagen (Pkw) oder Lastkraftwagen (Lkw), im Folgenden als Fahrzeuge bezeichnet. Die Interaktion der Verkehrsmittel bzw. deren Verkehrsmittelführer geschieht unter Berücksichtigung externer Einflüsse oder globaler Vorgaben wie beispielsweise Verkehrsregeln. Hier findet sich die *Verkehrsorganisation* als Prozess innerhalb der Ressourcen wieder. Eine adäquate Modellierung des Straßenverkehrs zieht demnach die Subsysteme Fahrer, Fahrzeug und Infrastruktur (sowie die Umwelt) mit ein. All diese Subsysteme können mit vielen Parametern näher beschrieben werden, die durch ihr Zusammenspiel ein gemeinsames Verhalten zeigen. Die Abbildung 3.5 zeigt die Kopplung dieser Subsysteme und nennt Beispiele für ihre Systemeigenschaften Zustand und Funktion [SD10]. Bei der Betrachtung eines einzelnen Fahrzeugs inklusive Fahrer hat sich die Benennung Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) etabliert. Auf der Betrachtungsebene individueller FFE stehen mikroskopische Größen (vgl. Abschnitt 2.1) im Vordergrund.

Im Straßenverkehr interagieren viele FFE miteinander. Abbildung 3.6 zeigt einen kleinen Abschnitt einer Verkehrswegeinfrastruktur, die mehrere FFE enthält. Die strukturelle Kopplung dieser in sich unabhängigen FFE wirkt sich im makroskopischen Verkehrsverhalten aus, welches durch die in Abschnitt 2.2 genannten makroskopischen Größen beschrieben werden kann.

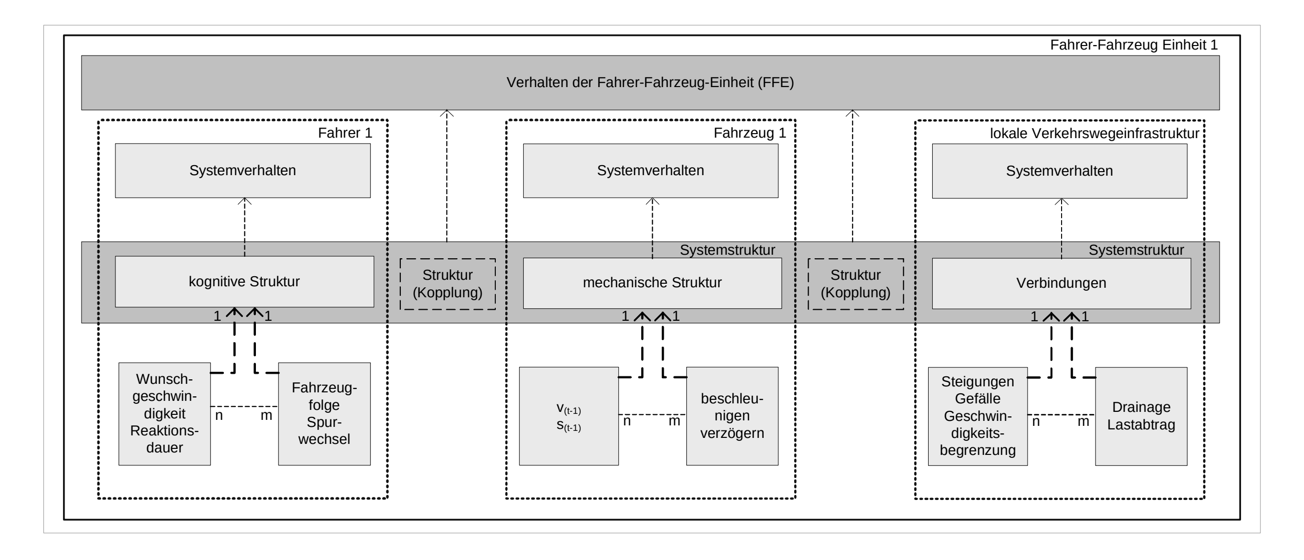


Abbildung 3.5: Verhalten einer einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE)

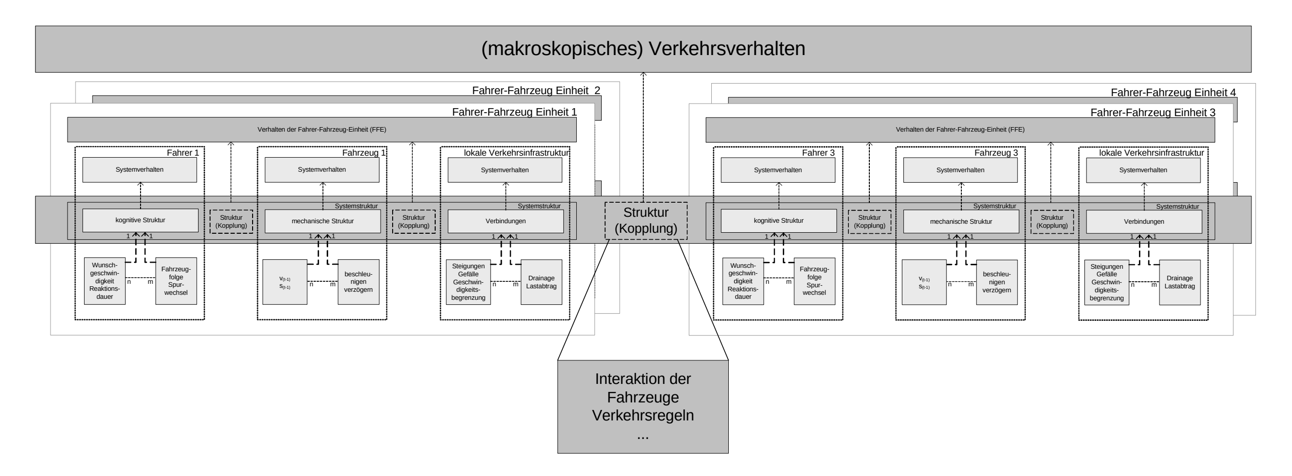


Abbildung 3.6: Emergentes Verhalten durch Interaktion mehrerer Fahrer-Fahrzeug-Einheiten

Aus Abbildung 3.6 können für die simulative Untersuchung von VAS die folgenden Aussagen abgeleitet werden:

- Nur mikroskopische Parameter sind unabhängige Variablen.
- Die unabhängigen Parameter auf mikroskopischer Ebene beeinflussen direkt das Verhalten einer einzelnen FFE. Interagieren mehrere autonome FFE, resultiert hieraus ein emergentes Verhalten. Dieses emergente Verhalten auf makroskopischer Ebene kann durch entsprechende Größen und Werte beschrieben werden.
- Makroskopische Größen können nur indirekt beeinflusst werden. Sie sind folglich abhängige Größen.

Da das VAS als erweitertes ACC-System eine Teilfunktionalität des Subsystems Fahrer hinsichtlich der Regelung der Längsdynamik des Fahrzeugs ersetzt, ergibt sich hieraus, dass die Simulation das Verhalten von Mensch und System (mikroskopisch) und damit einhergehend deren Unterschiede valide widergeben muss, um die Veränderung des Verkehrsflusses (makroskopisch) durch das System bewerten zu können. Das unterschiedliche

mikroskopische Verhalten wird sich in mehreren Fahrsituationen aufzeigen, wie beispielsweise dem Annähern an ein vorausfahrendes Fahrzeug, dem Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs, der Reaktion auf eine Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs oder dem Beschleunigen auf die gewünschte bzw. eingestellte Geschwindigkeit, sobald kein Fahrzeug vor dem eigenen Fahrzeug mehr vorhanden ist.

Zur Abbildung des VAS sollte soweit möglich der reale Algorithmus verwendet und in die Simulation integriert werden. Anpassungen sind notwendig, da die typische Simulationsschrittweite im Bereich von mehreren 100 ms liegt, der Regelalgorithmus aber ggf. eine kürzere Abtastrate vorsieht. So liegt die Abtastrate bereits etablierter Assistenzsysteme im Bereich zwischen 5 ms und 100 ms [Gan05]. Der reale Algorithmus enthält auch noch keine Modellierung der Fahrzeugdynamik, sodass diese ergänzt werden muss. Das reale System erhält Informationen von unterschiedlichen Sensoren des Fahrzeugs. In der Regel können diese Messwerte in der Simulation ermittelt werden, wobei eine empirische Messunsicherheit auch in der Simulation abgebildet werden sollte.

Die Abbildung des menschlichen Fahrverhaltens in Simulationsmodellen wird bereits seit mehreren Jahrzehnten untersucht (siehe Kapitel 4) und ist die besondere Herausforderung bei der Verwendung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von VAS, um das unterschiedliche Fahrverhalten eines Assistenzsystems im Vergleich zum menschlichen Fahrer abbilden zu können. Die einzige Ausnahme bildet lediglich die Untersuchung eines vollständig autonom fahrenden Systems bei 100 % Ausstattungsgrad der betrachteten Fahrzeuge, da in diesem Fall das menschliche Verhalten nicht mehr abgebildet zu werden braucht.

Bei der Abbildung des menschlichen Fahrverhaltens müsste dabei auch untersucht werden, ob es durch den Einsatz des VAS zu einem veränderten Verhalten der anderen menschlichen Fahrzeugführer kommt. Dieses wird in dieser Arbeit aufgrund des erheblichen Aufwands nicht betrachtet. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass nur zwischen Fahrzeugen, die mit einem VAS ausgestattet sind, und Fahrzeugen, die vom Menschen gesteuert werden, unterschieden werden muss. Fahrzeuge, die z. B. mit Assistenzsystemen wie einem herkömmlichen ACC-System ausgestattet sind, und damit ggf. ebenfalls gesondert modelliert werden müssten, werden nicht weiter berücksichtigt. Die Integration dieser beiden Aspekte kann in zukünftigen Forschungsvorhaben erfolgen.

Das VAS hat das Ziel den Verkehrsfluss zu optimieren und damit die maximal mögliche Verkehrsstärke insbesondere bei dichtem Verkehr zu erhöhen (vgl. Darstellung der Ziele der Verkehrsoptimierung im Fundamentaldiagramm in Abschnitt 2.4). Wie zuvor festgestellt sind diese makroskopischen Größen aber abhängige Größen und werden durch das Verhalten auf mikroskopischer Ebene beeinflusst.

Dabei wird nicht nur die Längsdynamik, sondern auch die Motivation zum Fahrstreifenwechsel, die Möglichkeit zum Fahrstreifenwechsel, die sich daraus ergebene Anzahl an Fahrstreifenwechseln und die Verteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Fahrstreifen einer mehrstreifigen Autobahn einen Einfluss auf den makroskopischen Verkehrsfluss haben. So schreiben z. B. die Autoren von [MB99], dass die maximale Verkehrsstärke für einen Fahrstreifen bei 2 500 bis 3 000 Fahrzeugen pro Stunde liegt. Bei einer mehrstreifigen Straße kann dieser Wert nach [MB99] nicht einfach mit der Fahrstreifenanzahl multipliziert werden, sondern die maximale Gesamtverkehrsstärke ist kleiner als der durch Multiplikation erhaltene Wert.

Die Autoren von [ADV06] schreiben in ihrer Arbeit, dass für das von ihnen untersuchte Cooperative-ACC-System Probleme beim Fahrstreifenwechsel für die anderen Fahrzeugführer auftreten, da die vom Cooperative-ACC-System eingehaltenen Abstände für Fahrstreifenwechsel der anderen Verkehrsteilnehmer zu klein sind. [MMB01b], [MMB01a] beschreiben, dass in Abhängigkeit der eingestellten Zeitlücke des ACC-Systems die eingehaltenen Abstände dazu führen, dass Fahrstreifenwechsel vom zweiten auf den dritten Fahrstreifen zwar ermöglicht werden, das nachfolgende Fahrzeuge aber anschließend stark verzögern muss und sich diese Verzögerung auf die weiteren nachfolgenden Fahrzeuge (ggf. verstärkt) auswirkt.

Es kann angenommen werden, dass zum einen die vom VAS eingehaltenen Abstände die Möglichkeit zum Fahrstreifenwechsel der anderen Fahrzeuge beeinflussen und zum anderen die durchgeführten Fahrstreifenwechsel, sowohl von den Fahrzeugen mit als auch von den Fahrzeugen ohne VAS, die Anzahl und Art der Eingriffe des VAS stark beeinflussen. Damit ist, obwohl das System keine Veränderung der Querdynamik innerhalb des eigenen Fahrstreifens oder im Rahmen von Fahrstreifenwechseln vornimmt, eine über die Längsdynamik hinausgehende Untersuchung des Fahrerverhaltens notwendig.

Die bis hier genannten Anforderungen an die mikroskopische Ebene der Simulation sind für quantitative Aussagen zur Optimierung des Verkehrsflusses dennoch nicht ausreichend. So schreibt Balci [Bal98] allgemein zum Thema Modellbildung: „Successfully testing each submodel (module) does not imply overall model credibility.“ Zur Erklärung seiner Aussage verwendet Balci die Darstellung in Abbildung 3.7 und erläutert [Bal98]:

> „We may find each submodel to be sufficiently credible, but this does not imply that the whole model is sufficiently credible. The allowable errors for the submodels may accumulate to be unacceptable for the entire model. Therefore, the entire model must be tested even if each submodel is found to be sufficiently credible.“

Es muss daher sichergestellt sein, dass das Simulationsmodell das in Abbildung 3.6 angedeutete emergente Verhalten durch die Interaktion der einzelnen FFE valide wiedergibt, und damit einhergehend die makroskopischen abhängigen Bewertungsgrößen für die Optimierung valide abbilden kann.

Als Konsequenz ergibt sich, dass die Anforderungen zur Untersuchung von VAS über die valide mikroskopische Abbildung hinausgehen. Es müssen beide Betrachtungsebenen mit einbezogen werden, um sicherzustellen, dass die Kopplung des mikroskopischen Verhaltens dem in der Wirklichkeit beobachtbaren makroskopischen Verkehrsverhalten entspricht sowie dass die erlaubten Abweichungen der Einzelmodelle von der Realität sich nicht zu einem inakzeptablen Fehler im Gesamtmodell akkumulieren.

Eine Detaillierung dieser Anforderungen auf konkrete Kenngrößen zum Vergleich von Realität und Simulation wird in Kapitel 6 vorgenommen. Hierzu sind Kenntnisse über die Grundlagen zur Simulation eines Straßenverkehrssystems (Kapitel 4) und zur Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen (Kapitel 5) notwendig.

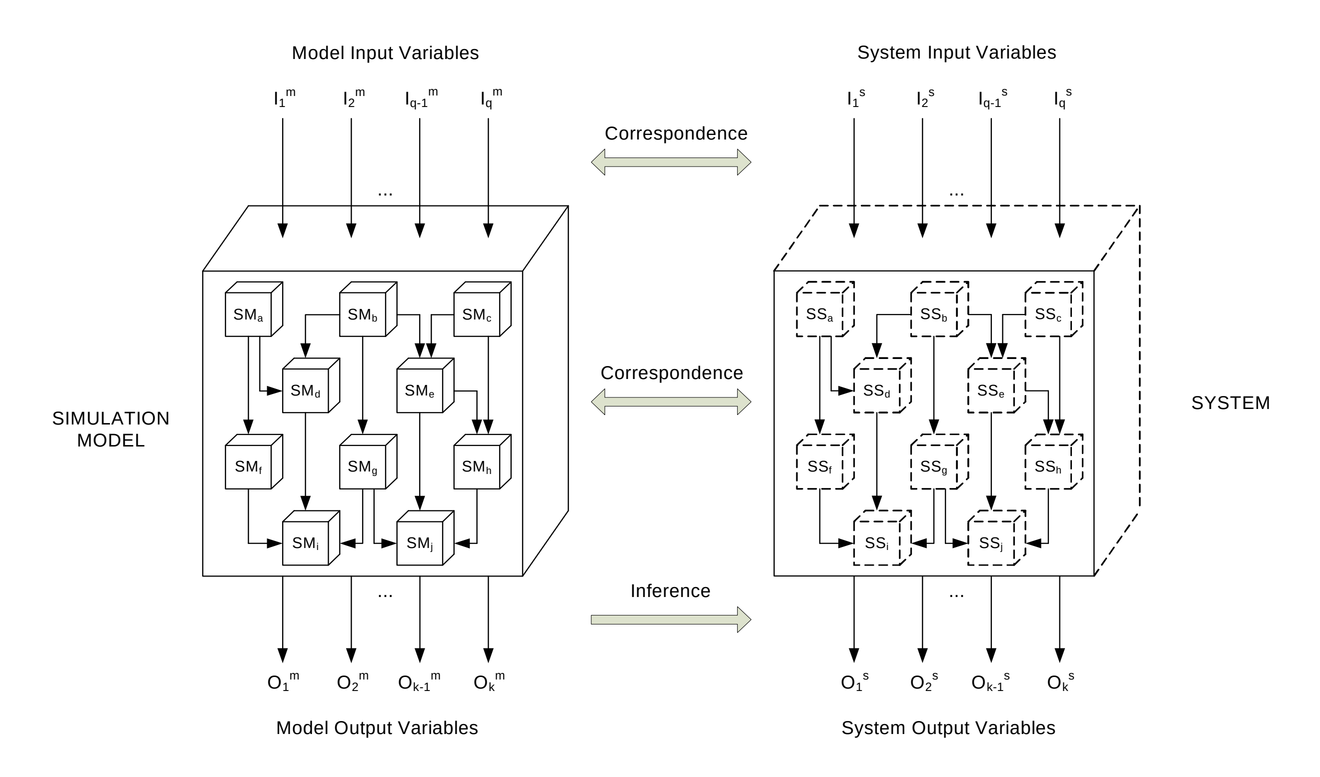


Abbildung 3.7: Modell- und Systemverhalten, nach [Bal98]

4 Grundlagen zur Simulation eines Straßenverkehrssystems

Heutige Verkehrssimulationsmodelle und -werkzeuge werden in unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt. Eine klassische Anwendung ist die Untersuchung von baulichen Veränderungen des Straßennetzes, wie etwa der Neubau als auch der Umbau von Straßen, oder auch die Untersuchung der Auswirkungen von Lichtsignalsteuerungen und deren Auslegung auf den Verkehrsfluss. Die Berechnung der Fahrzeugemissionen hat in den letzten Jahren dabei an Bedeutung gewonnen [LVZC+09]. Infolge immer leistungsfähigeren Rechnersystemen und der Weiterentwicklung der Simulationstechniken werden Verkehrssimulationen vermehrt auch in Verkehrsrechnerzentralen zur Verkehrsprognose eingesetzt, um den Fahrer über den aktuellen und prognostizierten Verkehrszustand zu informieren [Aut09] sowie die unterschiedlichen Stellglieder in einem komplexen Straßenverkehrsnetz zu steuern.

Neben den Werkzeugen zur Simulation eines Straßenverkehrssystems existieren auch Werkzeuge, die als Fahrzeugsimulationswerkzeug anzusehen sind, mit denen nur ein Fahrzeug bzw. wenige Einzelfahrzeuge, z. B. um verschiedene vorausschauende Systeme zum Fußgängerschutz zu bewerten, simuliert werden [Dyn10], [VTD10]. Der Fokus bei diesen Werkzeugen liegt auf der validen Abbildung der Fahrzeugumgebung und der Sensormodelle. Aufgrund der geringen Anzahl an simulierten Fahrzeugen sind diese Werkzeuge zur Untersuchung der Auswirkung von VAS auf den Verkehrsfluss nicht geeignet und werden daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

In den folgenden Abschnitten wird zuerst der allgemeine Aufbau von Verkehrssimulationswerkzeugen dargestellt (Abschnitt 4.1). Eine Einführung in die allgemeine Modellbildung wird in Abschnitt 4.2 gegeben. Die Entwicklung der Abbildung des menschlichen Fahrzeugfolgeverhaltens in Modellen ist in Abschnitt 4.3 aufgezeigt. Weniger häufig untersucht, aber für die Abbildung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen ebenso wichtig, ist die Modellierung des Fahrstreifenwechselverhaltens. Die bewährtesten Modelle sind in Abschnitt 4.4 zusammengefasst. Die bekanntesten Vertreter der Verkehrssimulationswerkzeuge, in denen die zuvor beschriebenen Modelle Anwendung finden, sind in Abschnitt 4.5 dargestellt.

4.1 Aufbau von Verkehrssimulationswerkzeugen

Verkehrssimulationswerkzeuge weisen einen grundsätzlich vergleichbaren Aufbau auf, der in Abbildung 4.1 in UML-Klassendiagramm Notation dargestellt ist. Neben einem oder mehreren Simulationsmodellen besitzen die meisten Werkzeuge zusätzlich eine Visualisierung, unterschiedliche Auswertewerkzeuge sowie umfangreiche Möglichkeiten für den Import und Export, um z. B. Steuerungspläne für Lichtsignalanlagen mit anderen Softwarewerkzeugen austauschen zu können.

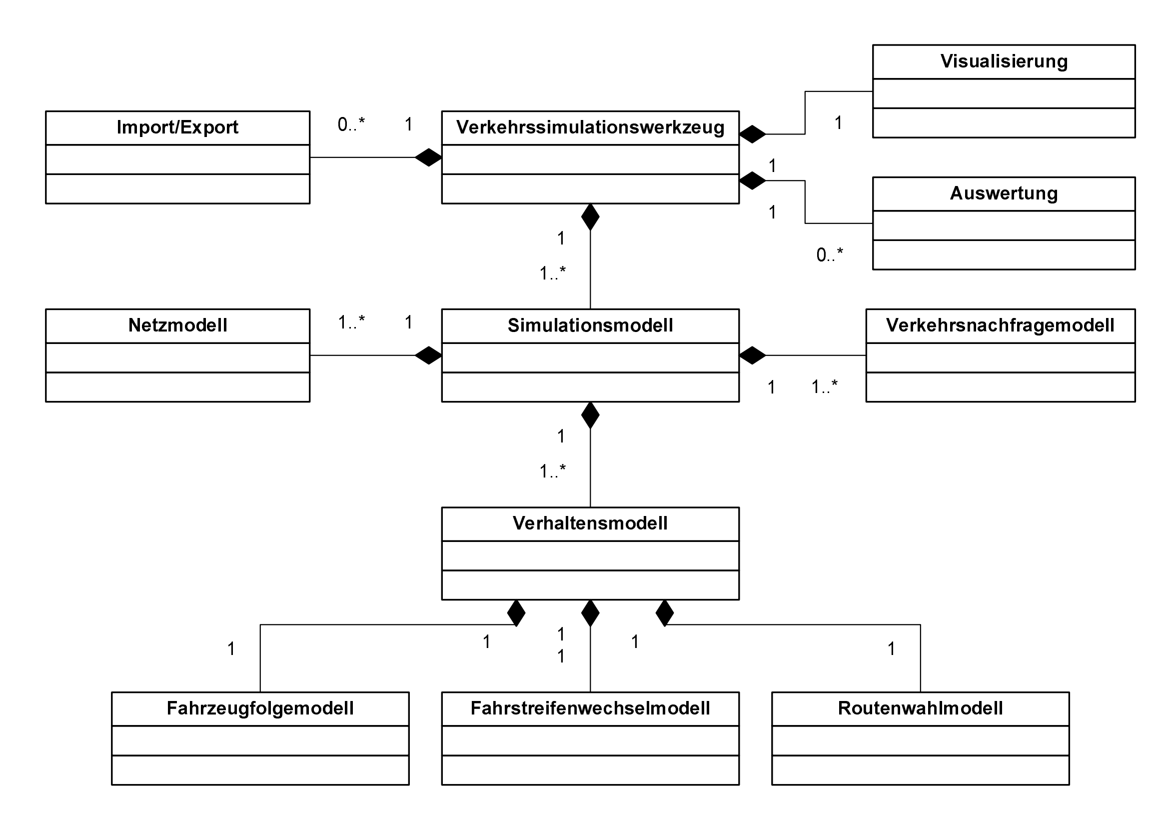


Abbildung 4.1: Aufbau von Verkehrssimulationswerkzeugen

Das *Simulationsmodell* lässt sich in erster Ebene in die drei Submodelle „*Netzmodell*", „*Verhaltensmodell*", sowie „*Verkehrsnachfragemodell*" unterteilen.

Durch das *Netzmodell* wird die Verkehrswegeinfrastruktur beschrieben. Neben dem Streckenverlauf und den resultierenden Knotenpunkten werden hiermit z. B. auch die Steuerungsalgorithmen von festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen beschrieben. Neben diesen statischen Daten können auch zeitlich veränderliche Daten als dynamische Daten, z. B. bei einer verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagensteuerung, im Netzmodell hinterlegt werden.

Das *Verhaltensmodell* beschreibt das Verhalten der Fahrzeuge in der Simulation. In Abhängigkeit des Detaillierungsgrads des Modells (vgl. Abschnitt 4.2) wird hier z. B. die Interaktion der FFE zueinander sowie zur Verkehrswegeinfrastruktur festgelegt. Typische Submodelle sind das Fahrzeugfolgemodell, das Fahrstreifenwechselmodell und das Routenwahlmodell. Das Fahrzeugfolgemodell bestimmt die Längsdynamik der FFE z. B. bei freier Fahrt oder dem Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs. Das Fahrstreifenwechselmodell beschreibt, unter welchen Voraussetzungen die FFE Fahrstreifenwechsel durchführen. Im Routenwahlmodell wird festgelegt, welchen Weg die FFE von einem Start- zu einem Zielpunkt auswählt. Die Route kann der FFE statisch bereits vor der Simulation oder dynamisch in Abhängigkeit des Verkehrszustands während der Simulation zugewiesen werden.

Das Verkehrsaufkommen, das in das simulierte Straßennetz eingespeist wird, wird im *Verkehrsnachfragemodell* festgelegt. Die Verkehrsnachfrage kann erstens unter Einbeziehung des Routenwahlmodells als O-D-Matrizen (Origin-Destination-Matrizen) festgelegt werden, in denen nur Start- und Endpunkt festgelegt sind und die zu fahrende Route während der Simulation dynamisch bestimmt wird. Zweitens können anstatt der dynamischen Festlegung auch explizite Routen für die einfahrenden Fahrzeuge vorgegeben

werden. Drittens und letztens kann das einfließende Verkehrsaufkommen für alle in der Simulation beginnenden Straßen festgelegt werden, wobei an Knotenpunkten innerhalb des Netzes Abbiegeanteile definiert sind. Bei diesem Vorgehen sind die Routen der Fahrzeuge im Vorfeld nicht fest definiert, sondern ergeben sich erst in der Simulation durch die Umsetzung der Abbiegeanteile.

Die Modellstruktur in Verkehrssimulationswerkzeugen lässt sich auch auf die klassischen drei hierarchischen Ebenen der Fahrzeugführungsaufgabe abbilden, die in Abbildung 4.2 dargestellt ist [Sch07, Wil04, Wit96]. Dabei ergibt sich folgende Zuordnung der Ebenen:

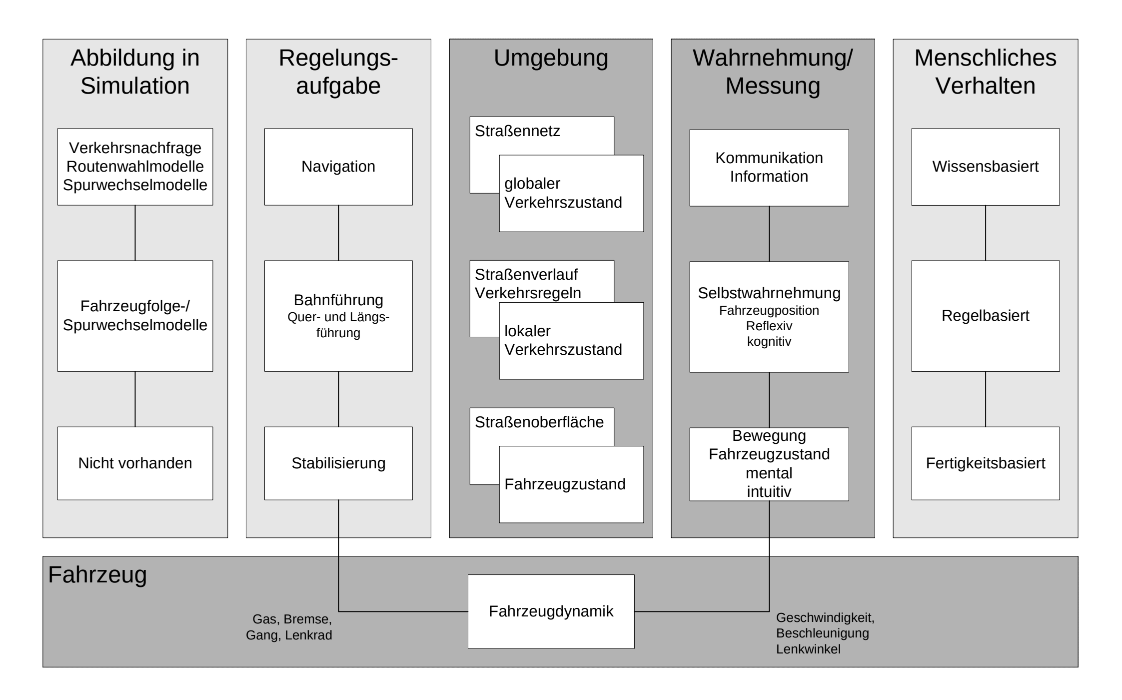


Abbildung 4.2: Ebenen der Fahrzeugführung und Abbildung in Verkehrssimulationswerkzeugen

- *Navigationsebene:* Die Verkehrsnachfrage und die Routenwahlmodelle sind der Navigationsebene zuzuordnen. Um im Straßenverkehrsnetz das angestrebte Fahrtziel zu erreichen, ist es notwendig an den Knotenpunkten den richtigen Fahrstreifen zu wählen, der die Weiterfahrt in Richtung des Ziels ermöglicht. Daher ist ein Teil des Modells, das das Fahrstreifenwechselverhalten beschreibt, der Navigationsebene zuzuordnen.

- *Bahnführungsebene:* Die nächste Ebene beschreibt die Bahnführung, d. h. die Quer- und Längsführung des Fahrzeugs. In der Realität steuert der Fahrer basierend auf seiner Wahrnehmung und vorhandener Erfahrungswerte sein Fahrzeug. Dieses Verhalten wird im Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodell wiedergegeben. Der Einfluss von anderen Verkehrsteilnehmern, Verkehrsregeln und des Streckenverlaufs geht in die Verhaltensmodellierung mit ein.

- *Stabilisierungsebene:* Aufgrund des aktuellen Fahrzeugzustandes ist in der Realität ein stabilisierender Eingriff des Fahrzeugführers notwendig, um die Fahrbewegung

sicher und komfortabel durchzuführen. Die Stabilisierungsebene wird vom Fahrer durch fertigkeitsbasiertes, reflexartiges Handeln beherrscht. Eine Abbildung dieser Ebene findet in Verkehrssimulationen bisher nicht statt.

Im Abgleich mit den Anforderungen zur Untersuchung eines VAS in Abschnitt 3.3 ergibt sich, dass die genannten Anforderungen an die mikroskopische Ebene der Bahnführungsebene sowie teilweise der Navigationsebene zuzuordnen sind.

4.2 Modellbildung

Die Abstraktion der Wirklichkeit auf bestimmte Erfordernisse einer Untersuchung wird Modell genannt. Im Rahmen von Verkehrssimulationsmodellen wird versucht, das Verhalten und Zusammenspiel der Verkehrsteilnehmer entsprechend der Untersuchungsanforderung nachzubilden. Einerseits werden bei der Modellbildung Vereinfachungen vorgenommen, anderseits muss das Modell in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstandes so detailliert sein, dass die für diese Untersuchung wesentlichen Eigenschaften im Modell valide abgebildet werden können.

Abbildung 4.3 zeigt das grundsätzliche Vorgehen zur Erstellung eines Simulationsmodells. Voraussetzung ist eine genaue Kenntnis über das zu modellierende *System*. Durch Abstraktion von der Realität erhält man ein *Modellkonzept* für das zu beschreibende System. Die Beachtung der vier Systemaxiome nach [Sch93] ermöglicht dabei eine strukturierte Vorgehensweise. Diese sind das Strukturprinzip, das Dekompositionsprinzip, das Kausalprinzip und das Temporalprinzip. Beim Strukturprinzip ist von besonderer Bedeutung, das zu modellierende System von der Umgebung abzugrenzen. Das Dekompositionsprinzip ermöglicht es, das System in eine Menge von Teilen zu zerlegen, die ebenfalls Systemmerkmale aufweisen. Die Zusammenhänge der Menge von Teilen und deren Veränderungen werden durch das Kausalprinzip erfasst. Die zeitlichen Veränderungen werden durch das Temporalprinzip berücksichtigt. Im Rahmen der Modellentwicklung handelt es sich bei der konzeptionellen Validierung um eine Überprüfung, ob das entworfene Modellkonzept grundsätzlich für den Anwendungsfall geeignet ist.

Nach der Fertigstellung des Modellkonzepts kann mit der Implementierung des *Simulationsmodells* begonnen werden. Die anschließende Verifikation ermittelt, ob das umgesetzte Modellkonzept sich wie das intendierte Modellkonzept verhält. Nach der Verifikation des Simulationsmodells kann das Modell zur Durchführung von Simulationen genutzt werden. Vor der Anwendung eines Simulationsmodells ist eine Kalibrierung und Validierung (diese ist nicht identisch mit der oben genannten konzeptionellen Validierung) des Simulationsmodells notwendig, um eine Übereinstimmung der *Simulationsergebnisse* mit dem beobachteten Systemverhalten sicherzustellen. Eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen wird in Kapitel 5 vorgenommen.

Die Modellierung des Verkehrsflusses reicht bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts zurück, als vorwiegend Physiker begannen, Verkehr mathematisch zu beschreiben. Es haben sich dabei insbesondere vier unterschiedliche Modellstrukturen entwickelt [Sch07], [Tra06], [Hel97]:

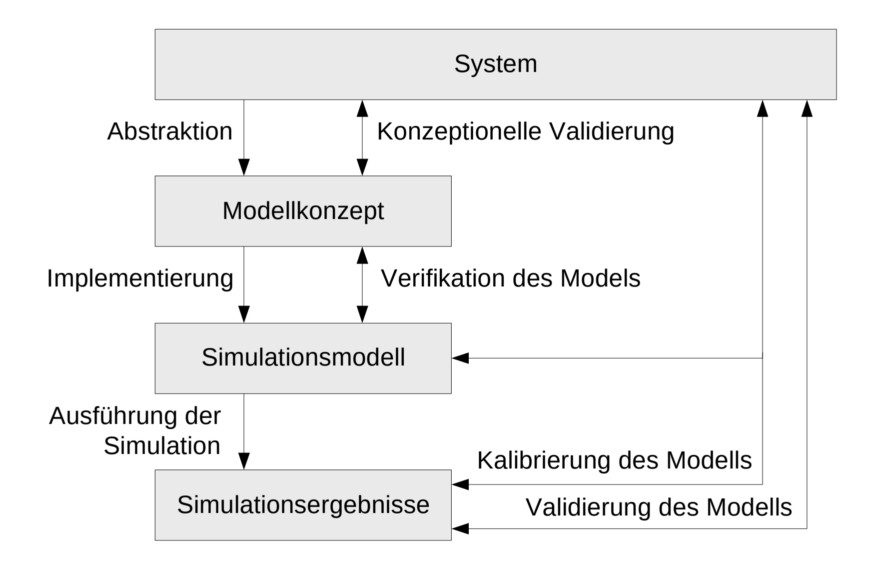


Abbildung 4.3: Zusammenhang von Verifikation, Validierung und Kalibrierung, nach [Aim09b], [Pap06]

- In *nanoskopischen* Modellen wird das Verhaltensmodell von Fahrer und Fahrzeug in ein detailliertes Fahrer- und Fahrzeugmodell heruntergebrochen. Bei der Modellierung des Fahrzeugs ist dieses z. B. die detaillierte Abbildung des Einflusses des Motors oder der Reifen auf die Fahrzeugdynamik. Das Fahrermodell beschreibt wie der Fahrer die Stellglieder Gaspedal, Bremspedal, Lenkung und Gangwahl des Fahrzeugs verwendet, um einem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen oder einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Rechenleistung beim Einsatz dieser Modelle wird dieser Ansatz nur selten verfolgt. Zur Untersuchung der Auswirkung von VAS hat dieser Ansatz den Vorteil, dass er die Möglichkeit schafft, detailliert die Unterschiede zwischen Mensch, Assistenzsystem und Fahrzeug abzubilden. Die notwendigen Simulationen zur Untersuchung des VAS sollen eine längere Zeitdauer und einen längeren Streckenabschnitt berücksichtigen. Diese würden bei der Verwendung einer nanoskopischen Simulation enorme Rechenleistungen erfordern. Außerdem wäre eine Nutzungslizenz für die erfolgreichste nanoskopische Simulation PELOPS (siehe Abschnitt 4.5) mit sehr hohen Kosten verbunden, sodass dieser Ansatz in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird.

- *Mikroskopische* Modelle sind die am häufigsten verwendeten Modelle zur Verkehrssimulation. Sie simulieren das Verhalten von Fahrer und Fahrzeug als eine gemeinsame FFE. Diese gemeinsame Modellierung von Fahrer und Fahrzeug ist als zulässig anzusehen. So schreibt [Ris91] „. . . der Fahrer [passt] sich einem geänderten Fahrzeugverhalten sehr gut [an] und [hält] dadurch das Verhalten des Regelkreises Fahrer + Fahrzeug nahezu konstant . . . “. Die Interaktionen der FFE werden anhand von Rechenvorschriften zur Ermittlung von Beschleunigung und Geschwindigkeit beschrieben. Mikroskopische Modelle simulieren häufig die Längs- und Querdynamik der Fahrzeuge in separaten Teilmodellen. Im Allgemeinen beruht die Dynamik der Fahrzeuglängsdynamik auf Variablen wie Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die Entwicklung der bedeutendsten verwendeten Fahrzeugfolgemodelle ist in Abschnitt 4.3 beschrieben. Für die Simulation der fahrstreifen-

übergreifenden Querdynamik sind die bekanntesten Fahrstreifenwechselmodelle in Abschnitt 4.4 dargestellt. Die Querdynamik eines Fahrzeugs innerhalb eines Fahrstreifens wird in mikroskopischen Modellen nicht berücksichtigt. Ein integrativer Ansatz zur Modellierung von Längs- und fahrstreifen-übergreifender Querdynamik in einem integrierten Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodell wurde von Toledo [TKBA09], [TKBA07], [Tol03] untersucht. Damit haben die Autoren die Möglichkeit, die Abhängigkeiten zwischen dem Fahrstreifenwechselverhalten und der Längsdynamik im Modell zu berücksichtigen.

- In *mesoskopischen* Verkehrsmodellen werden zwar Einzelfahrzeuge simuliert, das Verhalten der Fahrzeuge beruht aber nicht auf Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug, sondern die Fahrzeugdynamik wird anhand von makroskopischen Zusammenhängen, wie etwa einer Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung, beschrieben.

- *Makroskopische* Verkehrsmodelle vernachlässigen die Abbildung der Einzelfahrzeuge. Die Modellierung erfolgt auf einem hohen Abstraktionslevel, sodass sich die Aussagekraft dieser Ansätze ausschließlich auf aggregierte Kenngrößen wie Verkehrsdichte oder mittlere Geschwindigkeit beschränkt. Die Vorgehensweise zur Modellierung ähnelt den Ansätzen zur Beschreibung der Dynamik von Flüssigkeiten. Makroskopische Modelle werden in einigen Simulationswerkzeugen in Ergänzung zur mikroskopischen Simulation eingesetzt, um das sogenannte travel behaviour für größere Netze, wie etwa die Verteilung des Verkehrsaufkommens auf unterschiedliche Routen, zu berechnen.

  Herauszuheben ist, dass die makroskopische Simulation keine einzelnen FFE simuliert und daher diese Simulation eine Betrachtung auf mikroskopischer Ebene nicht erlaubt. In Abschnitt 3.3 wurde ermittelt, dass es für die Untersuchung des VAS notwendig ist, die Unterschiede des mikroskopischen Verhaltens von Fahrer und System valide abzubilden. „... bei der Auswahl des Simulationsmodells [ist] darauf zu achten, dass durch die Abstraktionen nicht wesentliche Eigenschaften des Untersuchungsgegenstandes ausgeblendet werden“ [Tra06]. Um die Unterschiede von menschlicher Längsführung als auch der Längsführung durch das System abbilden zu können, ist es notwendig, das Verhalten der Einzelfahrzeuge zu simulieren, sodass ein makroskopisches Modell dem Gegenstandsbereich aus grundsätzlichen Erwägungen heraus nicht gerecht werden kann. Aus diesem Grund muss auch der oben genannte mesoskopische Modellansatz ausgeschlossen werden, da in diesem Ansatz keine Interaktion der Fahrzeuge berücksichtigt wird.

In Ergänzung zu den vorgestellten Modellstrukturen gibt es noch Kombinationen von mikroskopischen und makroskopischen Modellen, die *hybride Modelle* genannt werden. Je nach Bedarf werden in der Simulation für ausgewählte Streckenabschnitte einzelne Fahrzeuge simuliert, für die verbleibenden Streckenabschnitte wird eine aggregierte Betrachtung durch makroskopische Modelle durchgeführt. An Anschlussstellen kann z. B. die Interaktion der Fahrzeuge von besonderem Interesse sein, sodass dieser Streckenabschnitt mikroskopisch simuliert wird. Der Abschnitt zwischen zwei Anschlussstellen könnte aber makroskopisch simuliert werden, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Auch die Kombination von mesoskopischen und mikroskopischen Modellen wird als hybrides Modell bezeichnet

[CHJ02]. Beide Kombinationen bieten damit die Möglichkeit, große Verkehrsnetze effizient zu simulieren.

4.3 Fahrzeugfolgemodelle

Zur Modellierung des menschlichen Fahrerverhaltens hat sich eine Vielzahl z. T. unterschiedlicher Modelle etabliert. Eine Übersicht bietet z. B. [Sch07], [Hen04], [Che92] und [Ris91]. In diesem Abschnitt wird die geschichtliche Entwicklung der Fahrzeugfolgemodelle dargestellt, insbesondere werden die Modelle beschrieben, die in die bedeutendsten am Markt erhältlichen Verkehrssimulationswerkzeugen Einzug erhalten haben (siehe Abschnitt 4.5). Anschließend werden in Abschnitt 4.4 die bekanntesten Vertreter der Fahrstreifenwechselmodelle dargestellt. Einen Überblick über die nachfolgend ausführlich dargestellten Fahrzeugfolgemodelle gibt Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Übersicht der betrachteten mikroskopischen Fahrzeugfolgemodelle

Modellart	**Ausprägung**		**Auflösung**	
	Autor	**Jahr**	**zeitlich**	**örtlich**
Stimulus-Response	Reuschel	1950	kont.	kont.
	Pipes	1953	kont.	kont.
	Chandler/Herman/Montroll	1958	kont.	kont.
	Gazis/Herman/Rothery	1961	kont.	kont.
Safety-Distance	Kometani/Sasaki	1959	diskret	kont.
	Gipps	1981	diskret	kont.
	Krauß	1998	diskret	kont.
Psycho-physisch/ Action-Point	Wiedemann	1974	diskret	kont.
	Fritzsche	1994	diskret	kont.
Zellularautomaten	Schütt	1990	diskret	diskret
	Nagel/Schreckenberg	1992	diskret	diskret

4.3.1 Stimulus-Response

Ein sehr einfaches mikroskopisches Modell ist die menschliche Regelung der Geschwindigkeit als Funktion der Fahrzeugabstände zwischen zwei Fahrzeugen i und i-1 (Gleichung (4.1)).

$$v_i(t) = F(s_{i-1}(t) - s_i(t)) = F(\Delta s_{i-1,i}(t)) \tag{4.1}$$

Aus (4.1) folgt durch Differenzieren:

$$\dot{v}_i(t) = F'(s_{i-1}(t) - s_i(t)) \cdot (v_{i-1}(t) - v_i(t)) = F'(\Delta s_{i-1,i}(t)) \cdot \Delta v_{i-1,i}(t) \tag{4.2}$$

Setzt man die Funktion $F'(\Delta s_{i-1,i}(t))$ als konstant zu λ mit der Dimension s^{-1} an, erhält man:

$$\dot{v}_i(t) = \lambda \cdot (v_{i-1}(t) - v_i(t)) = \lambda \cdot \Delta v_{i-1,i}(t) \tag{4.3}$$

Dabei beschreibt λ die Sensitivität des Fahrers auf Geschwindigkeitsdifferenzen zu reagieren. Damit ergibt sich die Regelung der Beschleunigung bzw. Verzögerung des Folgefahrzeugs als Funktion der Differenzgeschwindigkeit zwischen Führungsfahrzeug und Folgefahrzeug. Die Gleichung (4.3) wurde bereits Anfang der 50er Jahre von *Reuschel* [Reu50] und *Pipes* [Pip53] veröffentlicht und von *Chandler, Herman* und *Montroll* [CHM58] erweitert. Die Erweiterung bezieht sich hierbei auf die Hinzunahme einer zeitlichen Verzögerung durch die Reaktionsdauer τ des Fahrers. Damit wird (4.3) zu:

$$\dot{v}_i(t) = \lambda \cdot (v_{i-1}(t-\tau) - v_i(t-\tau)) = \lambda \cdot \Delta v_{i-1,i}(t-\tau) \tag{4.4}$$

Es ergibt sich eine Aktion des Fahrers, die von der Sensitivität und dem Stimulus, im vorliegenden Fall der Geschwindigkeitsdifferenz, abhängig ist. In allgemeiner Form kann damit das Verhalten eines Fahrers mit Hilfe der Gleichung

$$\text{Aktion} = \text{Sensitivität} \cdot \text{Stimulus}$$

beschrieben werden [Gab91].

Abbildung 4.4 zeigt das zuvor beschriebene Modell für die menschliche Geschwindigkeitsregelung zweier Fahrzeuge hinter einem Führungsfahrzeug.

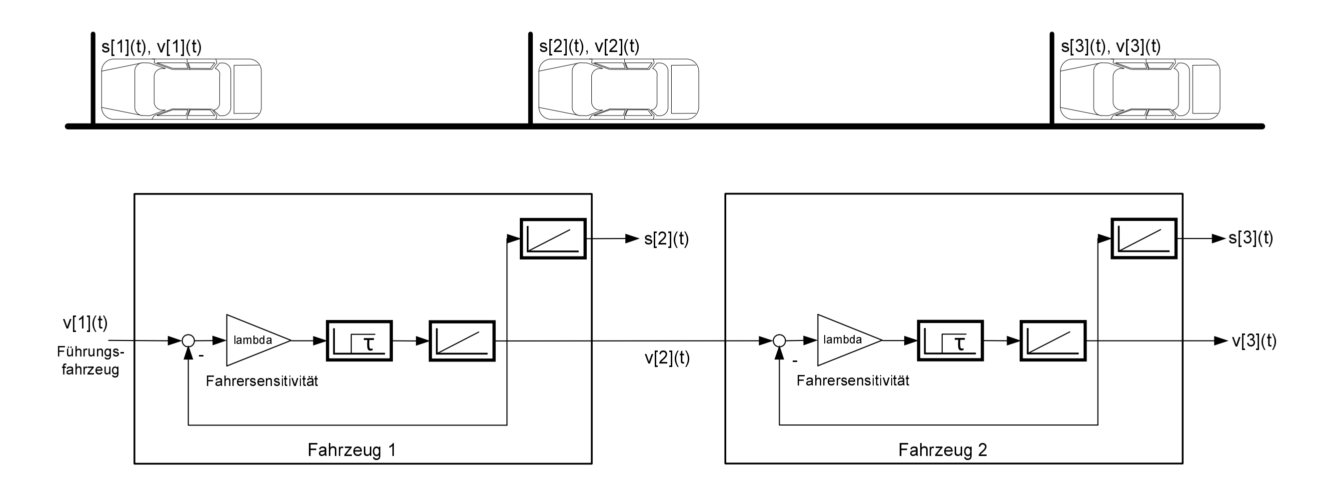


Abbildung 4.4: Menschliche Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeiten

Es ist in der Abbildung 4.4 und anhand der Gleichung (4.4) zu erkennen, dass die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs nur von der Geschwindigkeitsdifferenz und nicht vom Abstand der Fahrzeuge abhängig ist. *Gazis, Herman, Potts* und *Rothery* erweiterten daher Gleichung (4.4) zur nachstehenden Gleichung (4.5) [GHP59], [GHR61], [BM99]. Diese ist auch als GHR-Modell bekannt.

$$\dot{v}_i(t) = \frac{\lambda_0 [v_i(t)]^m}{[\Delta s_{i-1,i}(t-\tau)]^l} \cdot \Delta v_{i-1,i}(t-\tau) \tag{4.5}$$

Hierbei wird die Geschwindigkeitsänderung nicht nur von der Differenzgeschwindigkeit und der Sensitivität des Fahrers, sondern zusätzlich vom Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und von der eigenen Geschwindigkeit bestimmt. m und l sind dabei empirisch

durch Verkehrsbeobachtung zu bestimmende Parameter. Werden m und l zu null gesetzt, ergibt sich die zuvor betrachtete Gleichung (4.4).

Eine Vielzahl an Untersuchungen wurde in den folgenden Jahren durchgeführt, um die Parameter m und l zu bestimmen. Eine Auswahl zeigt Tabelle 4.2. Dabei wird teilweise in Phasen der Verzögerung (dcn) und Phasen der Beschleunigung (acn) unterschieden. Die Phase der Verzögerung kann noch in mit Betätigung (dcn brk) oder ohne Betätigung (dcn no brk) des Bremspedals unterschieden werden.

Tabelle 4.2: Auswahl an identifizierten Parametern für das GHR Modell, nach [BM99]

Quelle	**m**	**l**
Chandler et al. (1958) [CHM58]	0	0
Herman and Potts (1959) [HP59]	0	1
Gazis, Herman and Rothery (1961) [GHR61]	0-2	1-2
Hoefs (1972) [Hoe72] (dcn no brk/dcn brk/acn)	1.5/0.2/0.6	0.9/0.9/3.2
Treiterer and Myers (1974) [TM74] (dcn/acn)	0.7/0.2	2.5/1.6
Ozaki (1993) [Oza93] (dcn/acn)	0.9/-0.2	1/0.2

4.3.2 Safety-Distance

Entgegen dem auf Aktionen durch Stimuli hervorgerufenen Ansatz der klassischen Fahrzeugfolgemodelle basieren die „Safety-Distance“ Modelle (auch „Collission Avoidance“ Modelle genannt) auf der Einhaltung eines sicheren Folgeabstandes, sodass eine Kollision zum vorausfahrenden Fahrzeug ausgeschlossen ist.

Kometani und *Sasaki* präsentierten 1959 zuerst einen Ansatz dieser Art [BM99]. Zu den bekanntesten Modellen dieser Art gehört das Modell von *Gipps* aus dem Jahr 1981 [Gip81]. Gipps erarbeitete eine neue Beschreibung des Folgeverhaltens eines Fahrzeugs zu seinem vorausfahrendem Fahrzeug, die von bisherigen Beschreibungen abwich, indem er ein Modell entwarf, dessen Parameter mit offensichtlichen Charakteristiken des Fahrers und des Fahrzeugs übereinstimmen sollten. Sein Modell basiert auf der Annahme des Vorliegens von Grenzen der Performance des Fahrers und des Fahrzeugs und Verwendung dieser Werte zur Berechnung einer sicheren Geschwindigkeit in Bezug auf das vorausfahrende Fahrzeug. Der Fahrer wählt in dem Modell seine Geschwindigkeit in der Art und Weise, dass er sein Fahrzeug sicher zum Anhalten bringen kann, falls das vorausfahrende Fahrzeug mit größtmöglicher Verzögerung zum Stehen kommt. Um diesen sicheren Abstand einzuhalten, muss der nachfolgende Fahrer die maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs abschätzen. Solange der Fahrer diese Verzögerung nicht unterschätzt, sind grundsätzlich keine Zusammenstöße der Fahrzeuge in der Simulation möglich. Unterschätzt der Fahrer die maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs, ist er in der Lage stärker als seine eigentliche Wunschverzögerung zu verzögern, sodass die Simulation auch für diesen Fall unfallfrei bleibt. Die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs berechnet sich wie folgt:

$$v_n(t+\tau) = min\left\{ v_n(t) + 2.5a_n\tau\left(1-\frac{v_n(t)}{V_n}\right)\sqrt{(0.025+\frac{v_n(t)}{V_n})}\ , \right.$$
$$\left. b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n\left(2\left[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)\right] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right)} \right\} \quad (4.6)$$

mit

a_n	maximale Wunschbeschleunigung des Fahrers von Fahrzeug n
b_n	maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n
s_n	effektive Fahrzeuglänge des Fahrzeugs n (Fahrzeuglänge plus Abstand, den das Folgefahrzeug nicht bereit ist zu unterschreiten)
V_n	Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von Fahrzeug n
$\hat{b}$	durch den Fahrer von Fahrzeug n geschätzte maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n-1
$x_n(t)$	Position der Fahrzeugfront des Fahrzeugs n zum Zeitpunkt t
$v_n(t)$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs n zum Zeitpunkt t
τ	Reaktionsdauer des Fahrers

Das erste Argument der min-Funktion beschreibt die Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs bei Abwesenheit oder einem weit entfernten vorausfahrenden Fahrzeug, das zweite Argument beschreibt die Geschwindigkeit unter Einhaltung eines Sicherheitsabstandes zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. In seiner Arbeit unternimmt Gipps keine Kalibrierung des Modells, sondern führt Simulationen mit Parameterwerten durch, die in der Realität als realistisch für die Parameter anzusehen sind. Er validiert sein Modell qualitativ anhand der Darstellung der q-v Beziehung an einem Messquerschnitt sowie der Betrachtung der Fortpflanzung einer Störung entlang einer Fahrzeugkolonne von sieben Fahrzeugen.

Krauß entwirft in seiner Dissertation [Kra98] ein mikroskopisches Verkehrsmodell. Das Modell verwendet denselben Ansatz wie bereits Gipps, da beide Modelle von einer kollisionsfreien Fahrzeugbewegung ausgehen. Weiterhin trifft der Autor die Annahme, dass die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Fahrzeuge begrenzt ist, sowie dass sich die Fahrzeuge unter Berücksichtigung der vorherigen Annahmen mit der schnellstmöglichen Geschwindigkeit bewegen.

Unter der Voraussetzung einiger weiterer Annahmen untersucht Krauß sein Modell, ob es die bedeutsamen qualitativen Eigenschaften des Verkehrsflusses wiedergeben kann. Der Fokus liegt dabei auf der Abbildung von Staus in der Simulation. Bei der Untersuchung der qualitativen Eigenschaften seines Modells bezieht er sich auf die von Kerner und Rehborn veröffentlichten drei Phasen des Verkehrsflusses „free flow“, „synchronized flow“ und „jammed state“ [KR97], [Ker04]. Krauß beschränkt sich bewusst auf die Untersuchung des makroskopischen Verkehrsverhaltens auf Autobahnen, und verzichtet daher auf die Überprüfung der detaillierten mikroskopischen Abbildung. Er erwartet grundsätzlich nicht, dass sein Modell aufgrund seines einfachen Aufbaus geeignet ist, das mikroskopische Fahrer-Fahrzeug-Verhalten korrekt wiederzugeben. Im Anhang führt er dennoch einen Vergleich mit empirischen Daten einer Folgefahrt durch und zusätzlich mit den Simulationsergebnissen eines Modells basierend auf dem Ansatz von Wiedemann [Wie74] (siehe Unterabschnitt 4.3.3). Krauss kommt zu dem Ergebnis, dass beide Modelle etwa gleich gut die Folgefahrt abbilden, aber keines der Modelle aus seiner Sicht wirklich zufriedenstellende Ergebnisse auf mikroskopischer Ebene liefert.

Abschließend erweitert Krauß das Modell auf die Abbildung von mehrstreifigen Verkehr und erreicht mit diesem Modell eine gute Übereinstimmung von Simulationsergebnissen mit empirisch aus Leiterschleifen ermittelten Daten der zweistreifigen Autobahn A43. Er

vergleicht dabei die Verkehrsstärke je Fahrstreifen sowie den prozentualen Anteil an Fahrzeugen auf dem linken Fahrstreifen.

4.3.3 Psycho-physisch/Action-Point

In bisherigen Modellierungsansätzen wurde davon ausgegangen, dass ein Fahrer zum einen selbst sehr kleine Geschwindigkeitsdifferenzen zum vorausfahrenden Fahrzeug wahrnimmt und darauf reagiert und zum anderen diese Wahrnehmung unabhängig vom Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs ist. *Wiedemann* bezieht sich in seiner Habilitationsschrift [Wie74] bei der Erarbeitung seines Fahrzeugfolgemodells auf das Vorhandensein unterer Grenzen des Wahrnehmungsvermögens des Menschen, das sich auf den Zusammenhang bezieht, „dass die (psychologische) Empfindung eine Funktion des ausgeübten (physikalischen) Reizes ist“ [Wie74]. Die sich aus dieser Annahme für die Fahrzeugführung ergebenen Wahrnehmungsschwellen des Fahrers sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Das sich ergebende Fahrverhalten ist in der Abbildung anhand einer Beispieltrajektorie eines Fahrzeugs visualisiert. Im Beispiel fährt das Folgefahrzeug um Δv schneller als das Führungsfahrzeug, sodass sich der Abstand Δs verringert. Im Fall von sehr großen Fahrzeugabständen Δs wird der Fahrer durch den Geschwindigkeitsunterschied Δv zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht beeinflusst. Der Fahrer erkennt unterhalb der Wahrnehmungsschwelle den Geschwindigkeitsunterschied, sodass er seine Geschwindigkeit verringert und Δv dadurch kleiner wird, bis der Abstand etwa konstant bleibt. Da es dem Fahrer nicht möglich ist $\Delta v = 0$ einzuhalten, vergrößert sich für $\Delta v < 0$ der Abstand wieder, was zur Folge hat, dass der Fahrer wieder beschleunigt. Wiedemann beschreibt das Fahrzeugfolgeverhalten jeweils für vier in der Abbildung 4.5 dargestellten Bereiche „Unbeeinflusstes Fahren“, „Bewusst beeinflusstes Fahren“ (Annäherungsbereich), „Unbewusst beeinflusstes Fahren“ (Folgefahrt) und „Abwenden einer Gefahrensituation“ (Bremsbereich).

Damit ist das Modell in der Lage die empirisch beobachtbaren Oszillationen bei der Abstands- und Geschwindigkeitsanpassung abzubilden. Abbildung 4.6 zeigt die sich ergebene typische „close following spiral“, die mit einem Versuchsfahrzeug im realen Verkehrsgeschehen bei einer Folgefahrt aufgezeichnet wurde.

Besonderen Wert legt Wiedemann in seiner Arbeit auf die stochastische Beschreibung des Fahrzeugfolgeverhaltens. Die Wahrnehmungsschwellen, die maximale Beschleunigung als auch die maximale Verzögerung werden mithilfe von geschwindigkeitsabhängigen Normalverteilungen beschrieben.

Das Modell nach *Fritzsche* [Fri94] basiert auf den Modellannahmen von Wiedemann. Fritzsche unterteilt dabei die Fläche von Differenzgeschwindigkeit und Abstand zweier Fahrzeuge in insgesamt fünf Teilflächen. Dies sind „Freies Fahren“, „Folgen I“, „Folgen II“, „Annähern“ sowie „Gefahr“, wobei für die Bereiche „Folgen I“ und „Folgen II“ keine Aktion, d. h. z. B. keine Geschwindigkeitsänderung, vorgesehen ist, sodass effektiv vier unterschiedliche Aktionsbereiche übrig bleiben. Abbildung 4.7 zeigt die in [Fri94] aufgezeigten Bereiche des Fahrzeugfolgemodells. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Originaldarstellung an die Darstellung von Wiedemann angepasst. Die Anpassung bezieht sich auf die Definition der Differenzgeschwindigkeit Δv, die Wiedemann aus Sicht des nachfolgenden Fahrzeugs, Fritzsche aber aus Sicht des vorausfahrenden Fahrzeugs festlegt. In der Veröffentlichung [Fri94] wird neben dem Fahrzeugfolgemodell auch ein Fahrstreifenwechselmodell beschrieben sowie Simulationsergebnisse bei der Kombination dieser beiden

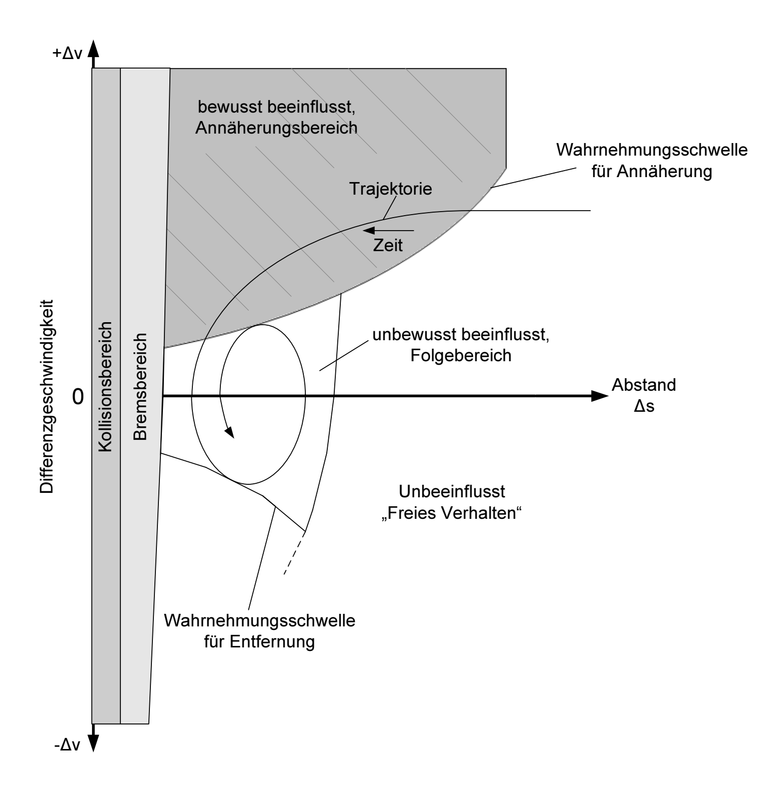


Abbildung 4.5: Bereiche des Fahrzeugfolgemodells von Wiedemann, nach [Wie74], [Leu88], [PTV08]

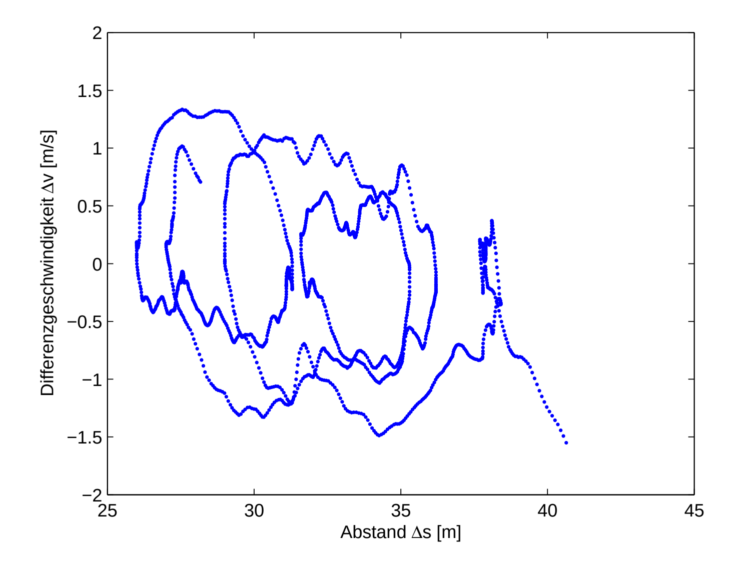


Abbildung 4.6: Typische „close following spiral“

Modelle.

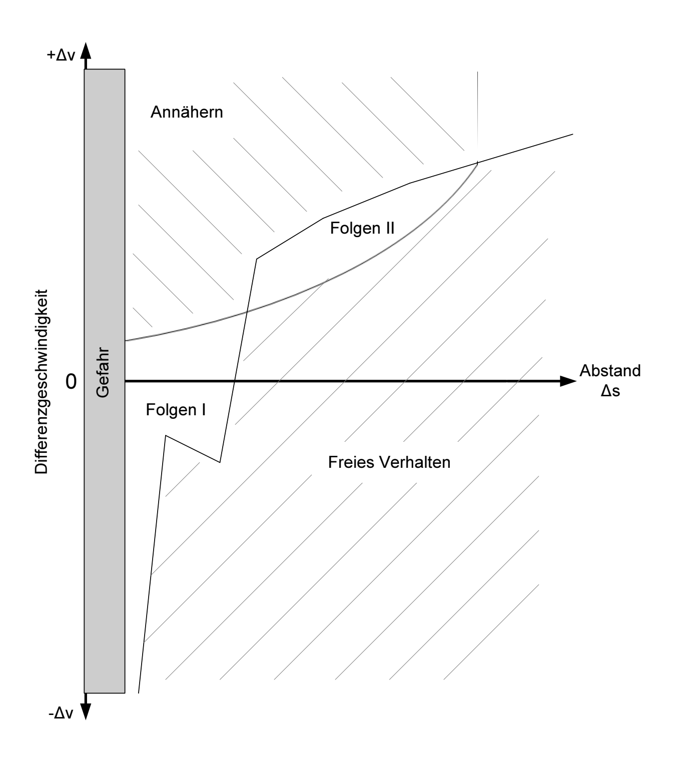


Abbildung 4.7: Bereiche des Fahrzeugfolgemodells von Fritzsche, nach [Fri94]

4.3.4 Zellularautomaten

Schütt beschreibt in seiner Dissertation [Sch90] ein bitorientiertes Verfahren zur Simulation von Straßennetzen, das auf einer mikroskopischen Modellierung basiert und sich durch ein besonders einfaches und dadurch schnell zu berechnendes Modell auszeichnet. Hierzu teilt der Autor das Verkehrsnetz in gleich lange Segmente, deren Länge dem mittleren Platzbedarf einer gemischten Pkw-Lkw-Zusammensetzung im Stillstand entspricht. Schütt legte für seine Simulation die Segmentlänge auf 7,5 m fest. Für jedes Segment wird im Rechner ein Bit verwendet, sodass damit die Zustände „frei“ und „durch ein Fahrzeug belegt“ abgebildet werden können. Durch die belegten Segmente werden die Fahrzeuge in der Simulation beschrieben, sodass eine mikroskopische Unterscheidung der einzelnen Fahrzeuge gegeben ist. Eine weitere Beschreibung von individuellen Eigenschaften dieser Fahrzeuge bzw. der FFE ist damit nicht möglich. Im Weiteren unterscheidet Schütt zwischen einem Stadtstraßenmodell und einem Schnellstraßenmodell, wobei im Folgenden nur Letzteres detaillierter betrachtet wird. Schütt fügt der Abbildung der Segmente im Rechnersystem weitere Ebenen zur Abbildung der Geschwindigkeit der Fahrzeuge hinzu. Da das Modell orts- und zeitdiskret ausgeführt wird, ergeben sich in Abhängigkeit von der Segmentlänge, der Simulationsschrittdauer und der gewünschten Maximalgeschwindigkeit diskrete Geschwindigkeitsstufen, die die Fahrzeuge einnehmen können. Tabelle 4.3 zeigt die von Schütt verwendeten Geschwindigkeitsstufen im Schnellstraßenverkehr für eine Simulationsschrittdauer von $\Delta t = 1\,s$ und einer Maximalgeschwindigkeit von $162\,km/h$.

Schütt sieht für unterschiedliche Fahrzeugklassen unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten und damit unterschiedliche maximale Geschwindigkeitsstufen vor. Die Bewegung

Tabelle 4.3: Geschwindigkeitsstufen des Modells von Schütt [Sch90]

Stufe l	0	1	2	3	4	5	6
Geschwindigkeit ($\frac{km}{h}$)	0.0	27.0	54.0	81.0	108.0	135.0	162

des Fahrzeugs ist dabei von fünf Mechanismen abhängig. Zusammengefasst beschreiben diese, dass der Fahrer das Ziel hat, mit der maximalen für seine Klasse zulässigen Geschwindigkeitsstufe zu fahren, dabei stets einen Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug hält und zusätzlich zufällig auch seine Geschwindigkeit, d. h. seine Geschwindigkeitsstufe, reduzieren kann. Nach Festlegung der Geschwindigkeitsstufe wird das Fahrzeug um genau den Stufenwert l an Segmenten vorwärts bewegt.

Als Weiterentwicklung des Modells von Schütt stellen *Nagel* und *Schreckenberg* 1992 ein Verkehrssimulationsmodell vor [NS92] und optimieren dieses Modell in den darauf folgenden Jahren konsequent weiter. Sie teilen den betrachteten Streckenabschnitt ebenfalls in gleich lange Teile von $\Delta s = 7,5\,m$; ebenso werden die Geschwindigkeit und die Zeit diskretisiert. In jedem dieser Abschnitte kann sich genau ein oder kein Fahrzeug befinden. Jedes sich auf einem dieser Abschnitte befindliche Fahrzeug besitzt eine weitere Variable, seine diskretisierte Geschwindigkeit v. Eine entsprechende Darstellung eines Streckenabschnitts zeigt Abbildung 4.8. Mithilfe von vier Regeln, die für jedes Fahrzeug nacheinander ausgeführt werden, wird die Fahrzeugbewegung simuliert. Diese sequenzielle Abarbeitung der vier Regeln wird in der Simulation gleichzeitig für alle Fahrzeuge durchgeführt. Die Regeln lauten [NS92],[SS93]:

- *Regel 1*: Beschleunigen: Alle Fahrzeuge mit einer normierten Geschwindigkeit v, die kleiner als die Maximalgeschwindigkeit $v_{\max}$ ist, beschleunigen um eine Geschwindigkeitseinheit $[v_1 = v + 1]$. Damit realisiert diese Regel den Fahrerwunsch, so schnell wie möglich bzw. wie erlaubt, zu fahren.

- *Regel 2*: Abbremsen: Ist der Abstand Δs eines Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug (berechnet als Position j des vorausfahrenden Fahrzeugs minus der Position i des betrachteten Fahrzeugs) nicht größer als seine momentane Geschwindigkeit v_1 ($\Delta s \leq v_1$), so wird es auf die neue Geschwindigkeit $[v_2 = \Delta s - 1]$ abgebremst. Somit wird die Wechselwirkung der Fahrzeuge zueinander hergestellt und sichergestellt, dass keine Unfälle passieren.

- *Regel 3*: Trödeln: Mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit p wird die Fahrzeuggeschwindigkeit eines fahrenden Fahrzeugs, das eine Geschwindigkeit größer als Null hat, um den Wert 1 verringert $[v_3 = v_2 - 1]$. Würde diese Regel nicht verwendet, läge ein deterministisches Modell vor, das nach Vorgabe einer Startbedingung stets dieselben Folgezustände erreicht. Hierdurch werden Schwankungen der Wunschgeschwindigkeit, Überreaktionen beim Bremsen oder Schwankungen beim Bremsen und Beschleunigen abgebildet.

- *Regel 4*: Fahren: Jedes Fahrzeug wird um v_3 Plätze weiterbewegt. Somit wird letztendlich die eigentliche Bewegung der Fahrzeuge realisiert.

Wird die Aktualisierung aller Regeln im Zeitschritt eines Ein-Sekundenrasters durchgeführt, entspricht dies bei der häufig verwendeten normierten Maximalgeschwindigkeit $v_{\max} = 5$ einer physikalischen Maximalgeschwindigkeit von 135 km/h.

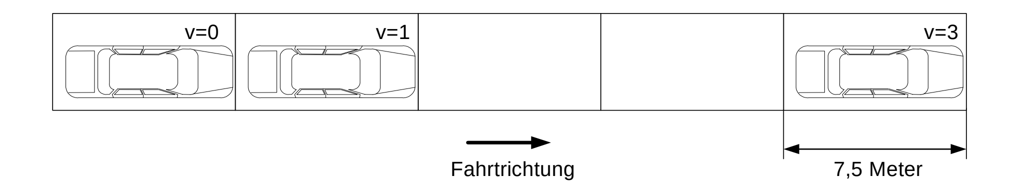


Abbildung 4.8: Zellularautomaten-Darstellung eines Streckenabschnitts

Aufgrund der einfachen Struktur des Modells können auch sehr große Verkehrsnetze in vielfacher Echtzeitgeschwindigkeit berechnet werden.

Seit seiner ersten Veröffentlichung wurde das Modell mehrfach erweitert und verbessert. Unter anderem wurden eine begrenzte Beschleunigung und ein begrenztes Bremsvermögen der Fahrzeuge bei zusätzlich von der Verkehrssituation abhängigem Fahrerverhalten (optimistisch, defensiv) mit aufgenommen. Statt der ursprünglichen Zellgröße von 7,5 m wird in neueren Arbeiten mit einer Zellgröße von 1,5 m gerechnet, sodass ein Fahrzeug nun zwei bis fünf aufeinanderfolgende Zellen belegt. Zum anderen wurde die oben eingeführte Wahrscheinlichkeit p durch eine von der Geschwindigkeit abhängige Wahrscheinlichkeitsfunktion ersetzt. Des Weiteren besteht in neueren Modellen die Möglichkeit mehrstreifige Straßen mit Fahrstreifenwechseln und Überholmanövern zu simulieren [MWC+05].

In Nordrhein-Westfalen wird dieses Modell zur Simulation und Vorhersage des Autobahnverkehrs innerhalb des Bundeslandes genutzt. Mithilfe von ca. 4000 Induktionsschleifen auf 2250 km wird das Verkehrsmodell im Minutentakt mit Informationen über den aktuellen Verkehrszustand versorgt [MWC+05]. Im Internet sind die aktuelle Verkehrslage sowie Prognosen für die Verkehrslage in 30 und 60 Minuten verfügbar [Aut09].

4.4 Fahrstreifenwechselmodelle

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die drei Fahrstreifenwechselmodelle von Sparmann, Gipps und Krajzewicz. Dies sind die in den bekanntesten Werkzeugen eingesetzten Modelle für das Fahrstreifenwechselverhalten. Einen Überblick über weitere Fahrstreifenwechselmodelle bietet z. B. [MMZ06].

Grundsätzlich berücksichtigen Fahrstreifenwechselmodelle in der Regel zum einen die Entscheidungen des Fahrers auf der Navigationsebene (siehe Abbildung 4.2), um den Fahrstreifen auszuwählen, der die Weiterfahrt zum gewünschten Ziel ermöglicht. Auf Bahnführungsebene entscheidet der Fahrer zusätzlich, ob ein Fahrstreifenwechsel aus taktischen Gründen, z. B. um mit einer höheren Geschwindigkeit fahren zu können, sinnvoll ist. Die Modellierung der Auswahl des Fahrstreifens wird auch als „lane-selection-model“ bezeichnet. Sieht der Fahrer einen Fahrstreifenwechsel für notwendig an, entscheidet er unter Berücksichtigung der umgebenden Fahrzeuge, ob ein Fahrstreifenwechsel zurzeit möglich ist. Diese Modellierung ist auch als „gap-acceptance-model“ benannt. Sind beide Modelle gemeint, wird vom „lane-changing-model“, dem Fahrstreifenwechselmodell, gesprochen.

4.4.1 Sparmann

Das Fahrstreifenwechselmodell nach *Sparmann* [Spa78] beschreibt das Verhalten von Verkehrsteilnehmern auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen auf Bundesautobahnen. Die Grundlage hierfür bilden empirische als auch theoretische Analysen. Sparmann beschreibt in seiner Untersuchung nur die Fahrstreifenwechsel „aus verkehrlichen Gründen". Dies sind Fahrstreifenwechsel aus taktischen Gründen auf Bahnführungsebene. Auf dieser Ebene wird bei der Modellierung durch Sparmann die Wahl der Fahrer durch das Rechtsfahrgebot der Straßenverkehrsordnung (StVO) maßgeblich beeinflusst. Hieraus ergibt sich eine Unterscheidung des Fahrstreifenwechselverhaltens in Abhängigkeit des aktuellen Fahrstreifens. Sparmann unterscheidet zwischen der „Überholspur" (linker Fahrstreifen) und der „Fahrspur" (rechter Fahrstreifen).

- Mit einem Wechsel auf die „Überholspur" versucht der Fahrer, seine Wunschgeschwindigkeit weitestgehend zu realisieren. Die Entscheidung zum Fahrstreifenwechsel bzw. zu einem Überholvorgang fällt der Fahrer bereits frühzeitig, um nicht in den Einflussbereich des langsameren vorausfahrenden Fahrzeugs auf dem aktuellen Fahrstreifen zu gelangen, um so möglichst seine aktuelle Geschwindigkeit beibehalten zu können. Der Fahrstreifenwechsel wird durchgeführt, wenn der nachfolgende Verkehr auf dem Nachbarfahrstreifen dies erlaubt. Ist aufgrund des „Sicherheitsbedürfnis[ses] des Fahrzeugführers" [Spa78] kein rechtzeitiger Fahrstreifenwechsel möglich, ist der Fahrer gezwungen, seine Geschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug anzugleichen.

- Ein Wechsel auf die „Fahrspur" geschieht in diesem Modell aufgrund des bereits erwähnten Rechtsfahrgebotes und der Intention, andere Fahrzeuge möglichst wenig zu behindern. Die Entscheidung für den Wechsel wird während des Überholvorganges getroffen. Sobald die Verkehrssituation dem Fahrer seine Wunschgeschwindigkeit auf der „Fahrspur" für eine gewisse Zeit zulässt bzw. ein rechtzeitiges Zurückkehren auf die „Überholspur" (d.h. bevor der Fahrer in den Einflussbereich eines langsameren vorausfahrenden Fahrzeugs kommt) möglich ist, wird der Fahrstreifenwechselvorgang auf die „Fahrspur" vollzogen. Das Fahrstreifenwechselvorhaben zurück auf die „Fahrspur" kann durch nachfolgende schnellere Fahrzeuge auf der „Überholspur" beeinflusst werden.

4.4.2 Gipps

Wie bereits das Fahrzeugfolgemodell (vgl. Unterabschnitt 4.3.2) basiert das Fahrstreifenwechselmodell von *Gipps* [Gip86] auf theoretischen Überlegungen. Erst zum Abschluss der Arbeit vergleicht Gipps Simulationsergebnisse mit empirischen Messdaten. Das Modell nach Gipps berücksichtigt bei der Wahl des Fahrstreifens, dass der Fahrer den für die Weiterfahrt im Straßenverkehrsnetz notwendigen Zielfahrstreifen einnimmt und dass der Fahrer möglichst mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren kann. Die Bedeutung dieser zwei Faktoren variiert in Abhängigkeit vom Abstand zum nächsten Abbiegepunkt. Hierzu definiert Gipps drei Zonen (siehe Abbildung 4.9).

In der am weitesten entfernten Zone 1 will der Fahrer möglichst mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren. Der Fahrer möchte auf den linken Nachbarfahrstreifen wechseln, wenn

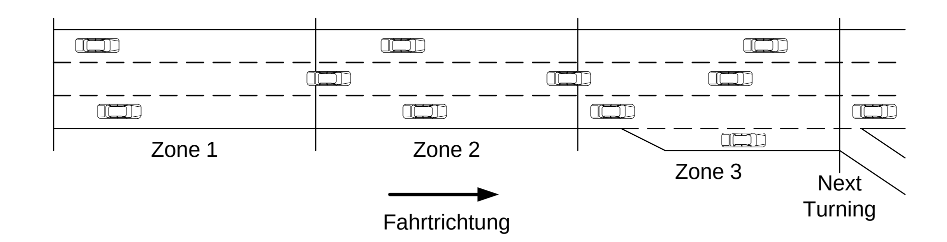


Abbildung 4.9: Zonen des Fahrstreifenwechsels nach Gipps, nach [Aim09b]

er dort mindestens 1 m/s schneller fahren kann. Er wechselt zurück auf den rechten Fahrstreifen, wenn er dadurch maximal 0,1 m/s langsamer fahren muss. In der mittleren Zone 2 wird versucht, den Zielfahrstreifen oder einen der direkten Nachbarfahrstreifen einzunehmen. In der letzten Zone 3 wird die Einhaltung der Wunschgeschwindigkeit ignoriert, um auf dem für die Weiterfahrt notwendigen Fahrstreifen zu bleiben bzw. dorthin zu wechseln. Die Fahrstreifenwechsel werden unter Berücksichtigung der „Safety“, die durch die Größe der einzunehmenden Lücke auf dem Nachbarfahrstreifen bestimmt wird, durchgeführt. In Abhängigkeit der drei Zonen und damit der Dringlichkeit eines Fahrstreifenwechsels verändert der Fahrer die Bewertung eines noch sicher möglichen Fahrstreifenwechsels.

4.4.3 Krajzewicz

Das Fahrstreifenwechselmodell nach *Krajzewicz* [Kra08] wurde für das Verkehrssimulationswerkzeug „SUMO“ (siehe Unterabschnitt 4.5.5) entwickelt. Durch taktische und strategische Entscheidungen des Fahrers soll die Wahl des optimalen Fahrstreifens unter anderem auch für komplexe Straßennetztopologien möglich sein. Der Fahrer hat die Möglichkeit notwendige Fahrstreifenwechsel zur Erreichung einer bestimmten Route durchzuführen. Bei ausreichender Distanz zum nächsten Knotenpunkt kann durch taktische Fahrstreifenwechsel eine höhere Geschwindigkeit auf dem Nachbarfahrstreifen eingenommen werden. Ausschlaggebend für den Fahrstreifenwechsel ist das Maß des Vorteils. Hierzu wird basierend auf dem Fahrzeugfolgemodell die einnehmbare Geschwindigkeit auf dem aktuellen und dem benachbarten Fahrstreifen bestimmt. Die Normierung der Differenz der beiden Geschwindigkeiten mit der maximalen Geschwindigkeit auf dem aktuellen Fahrstreifen bei freiem Verkehr wird errechnet und ist ein Maß für den Vorteil auf dem Nebenfahrstreifen. Während eines Fahrstreifenwechselversuchs kann es zu Interaktionen mit anderen Fahrzeugen kommen. Der Fahrer versucht daraufhin seine Geschwindigkeit anzupassen, um ein Einscheren zu ermöglichen. Auch die blockierenden Fahrzeuge auf dem Wunschfahrstreifen können ihre Geschwindigkeit dem Fahrstreifenwechselversuch anpassen. Während das vorausfahrende Fahrzeug hierzu beschleunigt, bremst das hinterherfahrende Fahrzeug ab.

4.5 Verkehrssimulationswerkzeuge

Abschließend werden in diesem Abschnitt die bekanntesten Verkehrssimulationswerkzeuge in alphabetischer Reihenfolge vorgestellt. Tabelle 4.4 zeigt eine Übersicht ausgewählter Eigenschaften der betrachteten Verkehrssimulationswerkzeuge.

Tabelle 4.4: Übersicht ausgewählter Eigenschaften von Verkehrssimulationswerkzeugen (Stand: 30. Mai 2010)

Werkzeug	aktuelle Version	Modell-ansatz				Modell: Fahrzeugfolge							Modell: Fahrstreifen-wechsel				Platt-form		
		nanoskopisch	mikroskopisch	mesoskopisch	makroskopisch	GHR 1959	Wiedemann 1974	Gipps 1981	Fritzsche 1994	Krauß 1998	Ahmed 1999 [Ahm99]	Toledo 2003 [Tol03]	Sparmann 1978	Gipps 1986	Fritzsche 1994 [Fri94]	Krajzewicz 2008	Windows	Linux	Mac OS X
AIMSUN	6.1.1		•	•	•			•						•			•	•	•
MITSIMLab	k.A.		•			•					•	•		•				•	
PARAMICS	6.7		•						•						•		•		
PELOPS	k.A.	•					•						•	•				•	
SUMO	0.12.0		•							•						•	•	•	
VISSIM	5.20		•				•						•				•		

4.5.1 AIMSUN

AIMSUN (**A**dvanced **I**nteractive **M**icroscopic **S**imulator for **U**rban and Non-Urban **N**etworks) wird von der spanischen Firma Transportation Simulation System (TSS) seit mehr als 20 Jahren entwickelt und laut Hersteller derzeit in 55 Ländern benutzt. In Deutschland wird die Software von der momatec GmbH vertrieben. In der neuesten Version, AIMSUN 6, können neben mikroskopischen auch makroskopische und mesoskopische Simulationen durchgeführt werden, um auch besonders große Verkehrsnetze effizient simulieren zu können. Den Fahrzeugen können Verbrauchs- und Schadstoffausstoßangaben zugeordnet werden, sodass AIMSUN in der Lage ist, Angaben zur Umweltbelastung zu machen, indem Gesamtkraftstoffverbrauch und -schadstoffemissionen für das betrachtete Verkehrsnetz und Verkehrsaufkommen berechnet werden. Als Modell für das Abstandsfolgeverhalten der Verkehrsteilnehmer wird das Modell nach Gipps (siehe Unterabschnitt 4.3.2) verwendet. Das Fahrstreifenwechselmodell von Gipps (siehe Unterabschnitt 4.4.2) bildet die Grundlage für den Fahrstreifenwechsel in der Simulation. AIMSUN ist außerdem in der Lage neben Kraftfahrzeugen, Fußgänger in die Simulation mit einzubinden.

Über ein ergänzend erhältliches Application Interface (API) ist der Zugriff von einer externen Applikation auf eine Vielzahl von Simulationsdaten während der Simulation möglich. Auf diese Weise kann eine individuelle Auswertung nach eigenen Kriterien durchgeführt werden. Weiterhin unterstützt das API, dass die externe Applikation die Steuerung von Modellobjekten in der Simulation vornimmt, wie z. B. die Steuerung von Lichtsignalanlagen oder Wechselverkehrszeichen. Die Modelle für die Fahrzeugbewegung können mithilfe des zusätzlichen AIMSUN Software Development Kit (SDK) durch eigene Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle ausgetauscht werden, die vom Anwender in C++ programmiert werden. Eine weitere Besonderheit ist, dass nahezu alle Algorithmen der verwendeten Verhaltensmodelle von AIMSUN im Benutzerhandbuch detailliert offengelegt sind.

4.5.2 MITSIMLab

MITSIMLab (**MIT Sim**ulation **Lab**oratory) wurde seit 1996 am Massachusetts Institute Technology (MIT) im Rahmen des „Intelligent Transportation Systems (ITS) Program“ entworfen. Ziel war die Entwicklung einer Simulation zur Untersuchung von Verkehrsmanagementsystemen, wie z. B. Wechselverkehrszeichen oder „In-vehicle route guidance“-Systeme. Dabei ist MITSIMLab sowohl über die Webseite des MIT [MIT10a] als auch über die Software-Plattform Sourceforge [MIT10b], die aktueller gepflegt ist, als Open-Source Software erhältlich. Die Software bietet damit die Möglichkeit, den Quelltext selber zu modifizieren. Allerdings kann die Software nur auf Linux-Systemen ausgeführt werden. MITSIMLab besteht aus insgesamt drei Modulen:

- Microscopic Traffic Simulator (MITSIM)
- Traffic Management Simulator (TMS)
- Graphical User Interface (GUI)

In MITSIMLab kommt ausschließlich ein mikroskopisches Simulationsmodell zum Einsatz. Das Fahrzeugfolgemodell wurde in den Jahren der Entwicklung mehrfach getauscht [Guo09]. In der ursprünglichen Fassung wurden in MITSIMLab in Abhängigkeit des Abstandswertes die Bereiche freie Fahrt, Fahrzeugfolge und Notbremsung [YK96] unterschieden. Bei freier Fahrt erreicht das Fahrzeug seine Zielgeschwindigkeit, die sich aus dem kleineren Wert von Wunschgeschwindigkeit und erlaubter Geschwindigkeit ergibt. Der Bereich der Fahrzeugfolge wurde dabei mit dem Modellansatz nach Gazis, Hermann und Rothery (GHR) (siehe Unterabschnitt 4.3.1) modelliert. Eine Notbremsung wird im Falle des Unterschreitens eines vordefinierten Mindestabstands zum vorausfahrenden Fahrzeug ausgelöst. Das Fahrstreifenwechselmodell beruhte auf dem Modell von Gipps (siehe Unterabschnitt 4.4.2) und ist im Detail in [ABAKM96] beschrieben.

Das Modell von *Ahmed* [Ahm99] nahm eine Erweiterung vor, indem in das vorherige Modell die aktuelle Verkehrsdichte vor dem jeweiligen Bezugsfahrzeug integriert wurde sowie eine gestutzte Normalverteilung für die Reaktionsdauer angenommen wurde [Guo09]. Bei hoher Verkehrsdichte sind ein zurückhaltendes Beschleunigen und ein verstärktes Bremsverhalten zu erwarten. In freier Fahrt strebt das Fahrzeug seine Wunschgeschwindigkeit an.

Als letzte Implementierung wurde das Modell von *Toledo* [Tol03] umgesetzt. Im Modell von Toledo wird das Fahrzeugfolgeverhalten und Fahrstreifenwechselverhalten integriert in einem Modell betrachtet, sodass geplante Fahrstreifenwechsel sich auf das Fahrzeugfolgeverhalten auswirken können. Das Beschleunigungsverhalten wird von kurzfristigen Entscheidungen und Zielen des Fahrers bestimmt. Toledo verwendet hierzu drei verschiedene Beschleunigungsmodelle. Im Modell „Stay-in-the-lane acceleration“ befindet sich der Fahrer auf dem gewünschten Fahrstreifen und hat keine Ambitionen diesen zu verlassen. Der Fahrer passt sein Beschleunigungsverhalten an das vorausfahrende Fahrzeug an. Bei freier Fahrt versucht der Fahrer seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Das „Acceleration during a lane change“-Modell wird für den Fall verwendet, dass eine Lücke auf dem Nachbarfahrstreifen eingenommen werden soll. Das Fahrzeugfolgeverhalten des Fahrers orientiert sich nun bereits an dem zukünftigen vorausfahrenden Fahrzeug auf dem Nachbarfahrstreifen. Im Modell „Target gap acceleration“ hat der Fahrer den Wunsch den Fahrstreifen zu wechseln, lehnt die Lücke auf dem benachbarten Fahrstreifen jedoch ab. In Abhängigkeit

von der gewünschten Lücke werden daher verschiedene Verhaltensmodelle zur Erreichung einer geeigneten Lücke benutzt.

4.5.3 QuadstonePARAMICS

QuadstonePARAMICS (**Para**llel **Mic**roscopic **S**imulation) wurde in Großbritannien entwickelt, ist seit 1998 auf dem Markt und wird von der Firma Quadstone vertrieben. QuadstoneParamics wird mittlerweile in über 40 Ländern verwendet. In erster Linie wird Paramics dazu benutzt, größere innerstädtische Verkehrsnetze als auch Autobahnen zu simulieren. Mit dem Paramics Modeller werden Simulationen entworfen und ausgeführt. Für das Folgeverhalten wird das psycho-physische Modell nach Fritzsche (siehe Unterabschnitt 4.3.3) verwendet. Das Fahrstreifenwechselverhalten stammt ebenfalls von Fritzsche [Fri94]. Über die Anwendung Paramics Monitor ist das Programm in der Lage, Schadstoffemissionen und Umweltbelastungen in die Simulation mit einzubinden. Die Modellierung von Fußgängern ist ebenfalls möglich. Um Simulationen auch in komplexen 3D-Ansichten präsentieren zu können, wird von Quadstone der Paramics Designer angeboten. Paramics verfügt über umfangreiche Schnittstellen, um z. B. Verkehrsnetze direkt in Paramics importieren zu können. Paramics SDK erlaubt dem Nutzer die eigenständige Erweiterung der vorhandenen Funktionen des Werkzeuges.

4.5.4 PELOPS

PELOPS (**P**rogramm zur **E**ntwicklung **l**ängsdynamischer mikr**o**skopischer Verkehrs**p**rozesse in **S**ystemrelevanter Umgebung) wurde seit 1990 von der Forschungsgesellschaft für Kraftfahrwesen Aachen (fka) zusammen mit der BMW AG entwickelt und wird heute von der fka vertrieben und gepflegt. Die Forschung- und Entwicklungsabteilungen in der Automobilindustrie machen den größten Anteil an Anwendern aus. Das Werkzeug basiert auf einem submikroskopischen Modell, welches drei Modellteile Fahrer, Fahrzeug und Strecke/Umwelt berücksichtigt und diese jeweils getrennt mit definierten Schnittstellen modelliert. Das Fahrermodell basiert auf dem psycho-physischen Ansatz von Wiedemann (siehe Unterabschnitt 4.3.3). Das Fahrstreifenwechselmodell ist nicht im Detail beschrieben, aber nach [For10] auf mehrere Modelle ([Gip86], [HB99], [Spa78], [The97]) zurückzuführen. Auch bei PELOPS besteht die Möglichkeit, die Modelle mit externen Modellen auszutauschen. Insbesondere existiert eine Schnittstelle zu Matlab®, die das direkte Einbinden von Fahrzeugmodellen oder Regelalgorithmen von Assistenzsystemen erlaubt. Um externe Soft- und Hardware integrieren zu können, verfügt das Programm über eine serielle Schnittstelle und eine CAN-Bus Anbindung.

4.5.5 SUMO

SUMO (**Si**mulation of **U**rban **M**obility") wurde 2001 als Open Source Project ins Leben gerufen und wird hauptsächlich von den Mitarbeitern des Instituts für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt. Die Weiterentwicklung ist dabei aufgrund des offengelegten Quelltextes für jedermann möglich. SUMO besteht dabei aus mehreren Programmpaketen. Diese sind u.a.

- Die eigentliche Simulation (SUMO)

- Grafische Benutzeroberfläche (GUISIM)
- Erstellung eines Straßennetzes (NETCONVERT/NETGEN)
- Berechnung von Routen (DUAROUTER/JTRROUTER/DFROUTER)

Die Idee hinter SUMO ist, ein erweiterbares Simulationsprogramm als Basis für eigene Weiterentwicklungen zur Verfügung zu stellen. Neben dem laut bereits im Namen enthaltenen städtischen Verkehr kann auch Autobahnverkehr abgebildet werden. In SUMO ist das Fahrzeugfolgemodell von Krauß (siehe Unterabschnitt 4.3.2) implementiert. Ursprünglich wurde auch das Fahrstreifenwechselmodell von Krauß in der Simulation verwendet. Da dieses aber strategische Fahrstreifenwechselvorgänge, also Fahrstreifenwechsel, die dem Fahrer die Weiterfahrt im Netz erlauben, nicht berücksichtigt, wurde seit 2006 ein eigenes Fahrstreifenwechselmodell entwickelt und von Krajzewicz veröffentlicht (siehe Unterabschnitt 4.4.3). Eine umfangreiche Dokumentation gibt es als Wiki im Internet [Sum10].

4.5.6 VISSIM

Die PTV AG hat ihren Hauptsitz in Karlsruhe und ist mit ihrem Simulationsprogramm VISSIM (**V**erkehr **i**n **S**tädten **Sim**ulation) Marktführer in Europa. Die Entwicklung von VISSIM begann 1992. VISSIM ist nur für die Modellierung der Verkehrsabläufe in mikroskopischen Modellen zuständig. Für die makro- und mesoskopischen Simulationen sind andere Programme aus dem Hause PTV AG, wie z. B. VISUM vorgesehen. Da sich das Programm auf den innerstädtischen Verkehr spezialisiert, können neben dem ÖPNV auch Fahrräder und Fußgänger modelliert werden. Die Simulation des Fahrverhaltens im innerstädtischen Verkehr stützt sich auf das psycho-physische Abstandsmodell von Wiedemann (siehe Unterabschnitt 4.3.3). Das hiervon erweiterte Modell von Wiedemann aus dem Jahr 1999 [PTV08] wird bei der Simulation für den Autobahnverkehr benutzt. Das Verhalten beim Fahrstreifenwechsel basiert auf dem Modell von Sparmann [Spa78]. VISSIM bietet eine sogenannte COM- Schnittstelle (component object model) an, die externen Programmen, wie z. B. Visual Basic, das Eingreifen in die Simulation ermöglichen. Die Modellierung des Fahrverhaltens kann der Nutzer durch selbst implementierte externe Modelle austauschen.

5 Kalibrierung und Validierung von mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen

Für aussagekräftige Simulationsergebnisse ist es notwendig, für jeden einzelnen Anwendungsfall die Parameter im Modell einzustellen und die Gültigkeit der gewählten Parameterwerte nachzuweisen. Die hierzu notwendige Kalibrierung und Validierung von mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen wird in diesem Kapitel dargestellt. Der Gesamtablauf einer Simulationsstudie wird in Abschnitt 5.1 beschrieben. Da die Untersuchung des VAS mit einem mikroskopischen Modell durchgeführt werden muss, bezieht sich die hier vorgestellte Vorgehensweise auf die Anwendung von mikroskopischen Modellen. Bisherige Anwendungen von mikroskopischen Simulationsmodellen lassen sich in drei Ansätze der Kalibrierung und Validierung unterscheiden, die in Abschnitt 5.2 dargestellt sind.

5.1 Ablauf einer Simulationsstudie

Die Durchführung einer Simulationsstudie kann in die fünf Phasen „Vorbereitung", „Entwicklung eines Basismodells", „Kalibrierung und Validierung", „Simulationsexperiment" und „Dokumentation" eingeteilt werden (siehe Abbildung 5.1) [Tra06].

Im Rahmen der *Vorbereitung* der Simulationsstudie ist die Aufgabenstellung zu definieren und ein geeignetes Simulationsmodell auszuwählen. Eine Übersicht über mögliche Kriterien zur Auswahl eines Simulationsmodells ist in [XAHM05] gegeben. Es ist die gewünschte Aussagegenauigkeit und der notwendige Detaillierungsgrad in Abhängigkeit der Aufgabenstellung festzulegen. Die zeitliche und örtliche Abgrenzung des Untersuchungsraumes ist vorzunehmen, zudem sind die erforderlichen statischen (Streckenverlauf, Geschwindigkeitsbeschränkungen, etc.) und dynamischen (Verkehrsaufkommen, etc.) Daten zu erfassen.

In der Phase der *Entwicklung eines Basismodells* werden die Verkehrsinfrastruktur und die Verkehrsnachfrage im Modell nachgebildet und auf Fehlerfreiheit überprüft. Eine Plausibilitätsprüfung ist auch mit der Visualisierung möglich.

Im nächsten und aufwendigsten Schritt ist die *Kalibrierung und Validierung* des Simulationsmodells notwendig. „Unter *Kalibrierung* wird das Einstellen der Modellparameter verstanden" [Tra06] (Herv. d. Verf.). Im Rahmen der Kalibrierung ist es notwendig, dass für den betroffenen Strecken- oder Netzabschnitt oder eines vergleichbaren Abschnitts empirische Messdaten vorhanden sind. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls müssen geeignete Kenngrößen für die Kalibrierung bestimmt werden. Das Ziel ist es, dass die Abweichung, die durch ein sogenanntes Fehlermaß (siehe Abschnitt 9.1) bestimmt wird, zwischen den Werten der simulierten Kenngrößen und den Werten der Kenngrößen aus den empirischen Messdaten minimal wird. Die Einstellung der Parameter kann sowohl manuell, auch „trial

and error“ genannt, als auch mit speziellen Algorithmen (siehe Abschnitt 9.2) automatisch erfolgen.

An die Kalibrierung schließt sich die *Validierung* des Modells an. Die Validierung des Modells soll den Nachweis erbringen, dass das Modell nicht nur für diesen einen betrachteten Messdatensatz hinreichende Ergebnisse liefert, sondern auch auf vergleichbare Situationen übertragbar ist. Demnach ist zu diesem Zweck ein weiterer Datensatz an Messdaten notwendig, oder falls nur ein Datensatz vorliegt, muss dieser für die Kalibrierung und Validierung vor der Kalibrierung aufgeteilt werden. Im Rahmen der Validierung werden die Parameter der Simulation nicht mehr verändert. Die Ergebnisse der Simulation werden mit dem zweiten Messdatensatz verglichen, indem erneut für eine geeignete Kenngröße ein Fehlermaß berechnet wird. Das Modell liefert valide Ergebnisse, wenn eine zuvor festgelegte Grenze des Fehlermaßes nicht überschritten wird.

Dadurch, dass die meisten Verkehrssimulationswerkzeuge dem Anwender eine weit entwickelte Visualisierung der sich bewegenden Fahrzeuge und der Umgebung bieten, scheinen die Fahrzeuge einer mikroskopischen Verkehrssimulation auch ohne Kalibrierung eine realitätsnahe Bewegung durchzuführen. Dieses ist eine der Ursachen, dass „in der Praxis Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle häufig vernachlässigt [werden]“ [Tra06].

Die Validierung des Modells muss sich nach der Aufgabenstellung richten. Kalibrierungs- und Validierungsdatensätze sollten unter vergleichbaren Bedingungen erhoben worden sein und „den Kern der Fragestellung direkt oder indirekt beschreiben“ [Tra06]. Es kann eine Vielzahl von Kenngrößen zur Validierung eingesetzt werden, es sollten jedoch solche Größen gewählt werden, die eine Aussagekraft zum gewählten Untersuchungsbereich haben. Es wird in [Tra06] empfohlen, die Validierung anhand mehrerer Kenngrößen durchzuführen. Tabelle 5.1 zeigt mögliche Kenngrößen zur Validierung in Abhängigkeit der Fragestellung, die in der Regel auch für die Kalibrierung verwendet werden. Bei der Anwendung des Simulationsmodells ist zu beachten, dass die Validierung stets nur eine Aussagegüte für einen bestimmten Bereich der Simulation erreicht.

Nach Abschluss der Validierung kann die eigentliche Anwendung des Simulationsmodells bei der Durchführung des *Simulationsexperiments* erfolgen. Dabei erlaubt nur ein ausreichend validiertes Modell, quantitative Aussagen aus der Simulation auf die Realität zu übertragen.

Den Abschluss bildet die *Dokumentation*, in der die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Simulationsstudie beschrieben sind.

Die obige Darstellung beruht auf der Veröffentlichung „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ aus dem FGSV Verlag [Tra06]. Das amerikanische Pendant ist die Publikation des U.S. Department of Transportation „Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software“ [DSA04]. Abbildung 5.1 zeigt eine vereinfachte vergleichende Darstellung der notwendigen Arbeitsschritte zur Durchführung einer Verkehrssimulationsstudie mit dem Fokus auf die Kalibrierung (und Validierung). In der Abbildung 5.1 ist zu erkennen, dass der Ablauf der beiden Vorgehensweisen sehr ähnlich ist. Ein großer Unterschied besteht allerdings in der Betrachtung der Validierung der Simulation. Während [DSA04] „presumes that the software developer has already completed this validation of the software and its underlying algorithms in a number of research and practical applications“, schreibt [Tra06], dass die „Validierung ... somit der Bestimmung der Zuverlässigkeit der erzielbaren Aussagen im jeweiligen Anwendungsfall [dient]“. Zudem heißt es dort: „Der Arbeitsschritt der Kalibrierung und Vali-

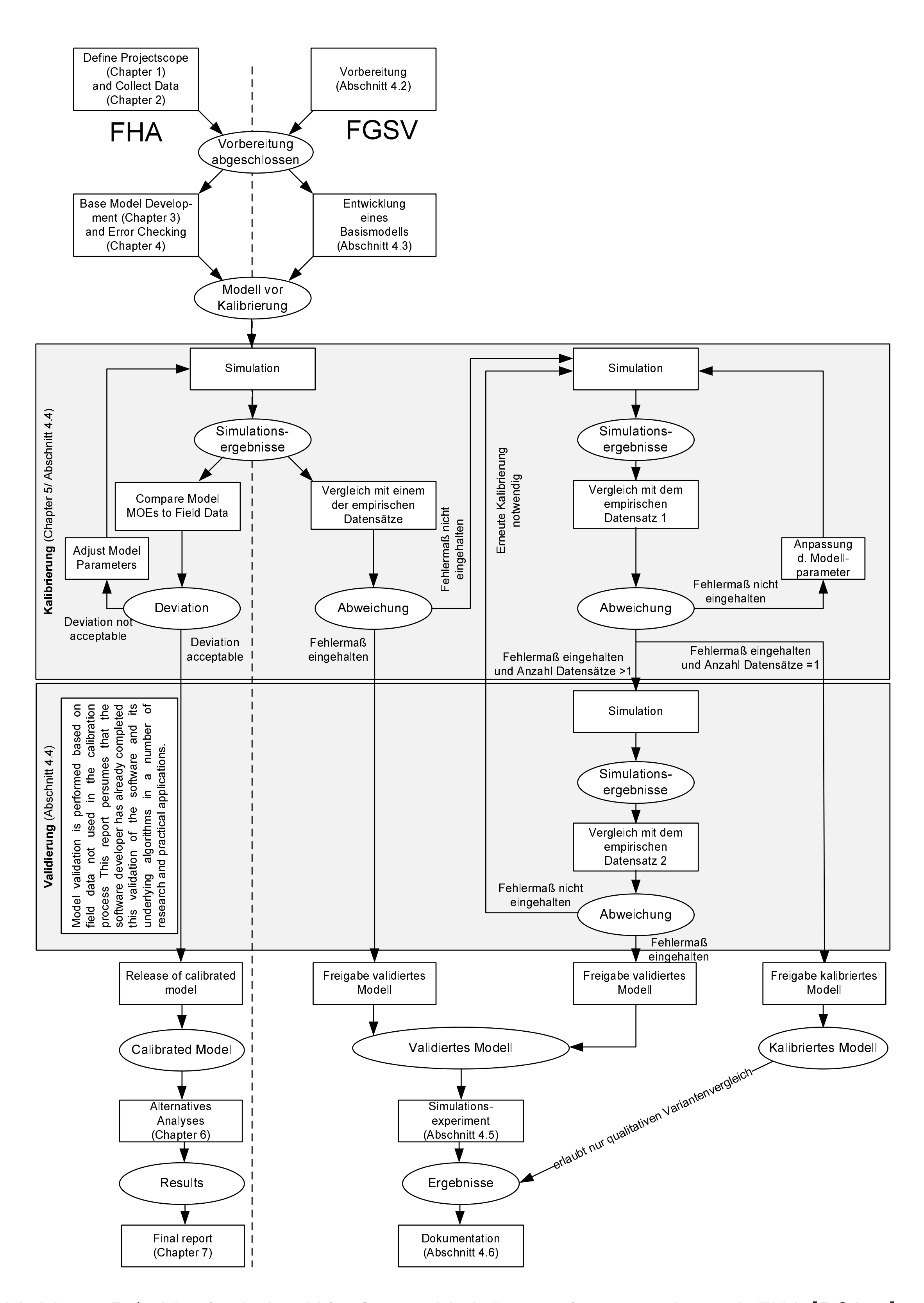


Abbildung 5.1: Vergleich des Ablaufs einer Verkehrssimulationsstudie nach FHA [DSA04] und FGSV [Tra06]

Tabelle 5.1: Typische Fragestellung und mögliche Kenngrößen zur Validierung, aus [Tra06]

Fragestellung	**Mögliche Validierungsgröße**
Einfahrverhalten	Zeitlückenverteilung Akzeptierte Zeitlücken Fahrstreifenaufteilung Ort und Anzahl der Fahrstreifenwechsel
Routensuche und Umlegung	Querschnittsbelastung Rückstaulänge Befolgungsraten Abbiegeraten Reisezeit
Kapazität einer Hauptfahrbahn	Verkehrsstärke Geschwindigkeit
Verkehrsablauf an einem plangleichen Knotenpunkt	Zeitbedarfswert Rückstaulänge Reisezeit Verlustzeit Grenzzeitlücken
Fahrerverhalten entlang eines Korridores	Geschwindigkeitsprofile Anzahl der Halte
Kapazität einer Abfertigungsanlage	Aufenthaltszeit Rückstaulänge

dierung ist für die Zuverlässigkeit der erzielbaren Aussagen im jeweiligen Anwendungsfall von entscheidender Bedeutung."

5.2 Stand von Wissenschaft und Technik

Im Stand der Wissenschaft und Technik lassen sich drei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Verkehrssimulationsmodells identifizieren.

- Im Ansatz I erfolgt eine Kalibrierung und Validierung eines *mikroskopischen Simulationsmodells* mit *empirischen mikroskopischen* Daten (siehe Unterabschnitt 5.2.1).

- Im Ansatz II erfolgt eine Kalibrierung und Validierung eines *mikroskopischen Simulationsmodells* mit *empirischen makroskopischen* Daten (siehe Unterabschnitt 5.2.2).

- Im Ansatz III erfolgt eine Kalibrierung und Validierung eines *mikroskopischen Simulationsmodells* mit *empirischen mikroskopischen und empirischen makroskopischen* Daten (siehe Unterabschnitt 5.2.3).

Diese Ansätze werden nachfolgend zusammen mit ihren Anwendungsbereichen vorgestellt und eine Bewertung der Anwendung zur Untersuchung von VAS vorgenommen.

5.2.1 Kalibrierung und Validierung nach Ansatz I

Abbildung 5.2 zeigt das grundsätzliche Vorgehen zur Kalibrierung und Validierung auf mikroskopischer Ebene. Es wird mit dem nicht kalibrierten Modell eine Simulation durchgeführt. In diesem Ansatz werden die erhaltenen mikroskopischen Kenngrößen der Simulation mit den empirischen Kenngrößen verglichen. Für diesen Vergleich sind geeignete Kenngrößen auszuwählen und ein Fehlermaß, das die Abweichung quantifiziert, zu berechnen. Ist die Abweichung zwischen Simulation und Realität größer als ein zuvor festgelegter Grenzwert, müssen die Parameter des Simulationsmodells durch die Kalibrierung angepasst werden. Die Anpassung der Parameter kann wie zuvor beschrieben sowohl manuell als auch mit speziellen Algorithmen (siehe Abschnitt 9.2) automatisch erfolgen. Hierbei wird oft nicht nur nach einem Parametersatz gesucht, der den Grenzwert unterschreitet, sondern der Parametersatz, mit dem das Minimum der Abweichung erreicht wird. Bei bleibenden Abweichungen oberhalb des Grenzwertes sind ggf. nicht nur die Parameter des Modells anzupassen, sondern die verwendeten Modellannahmen zu überprüfen.

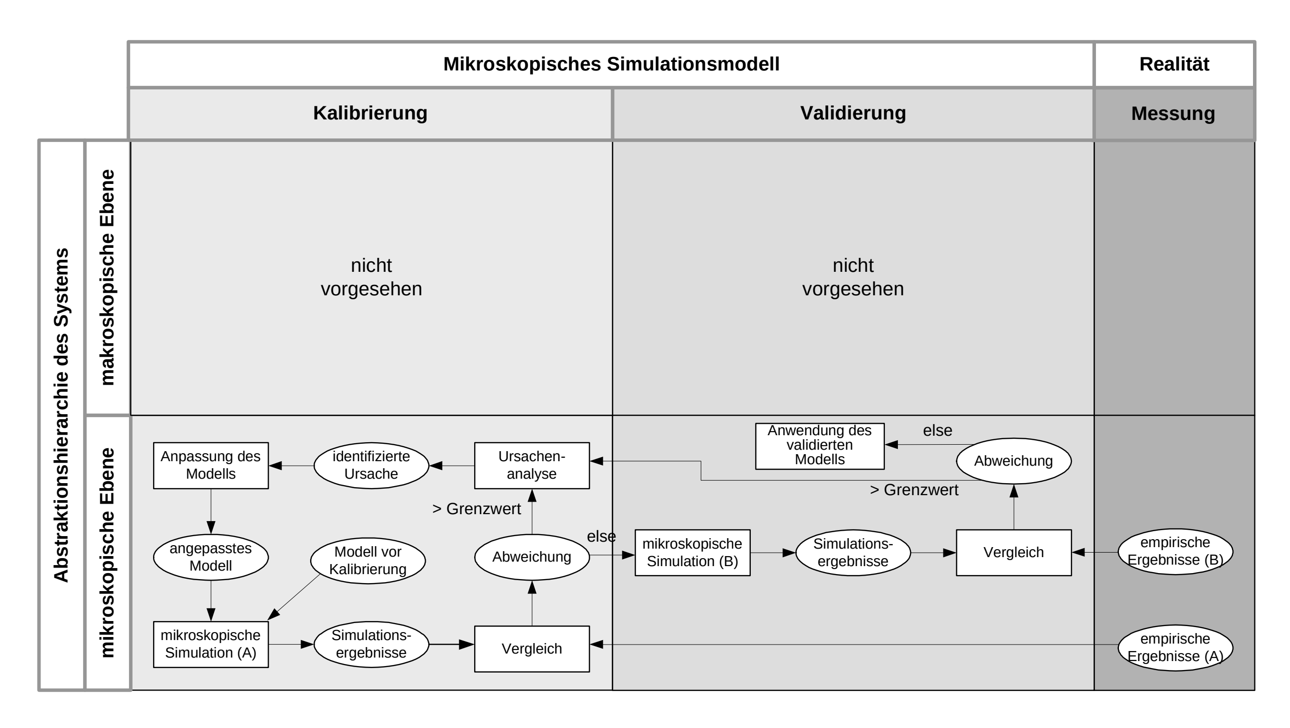


Abbildung 5.2: Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells nur auf mikroskopischer Ebene

Liegt die Abweichung unterhalb des Grenzwertes, kann die Validierung durchgeführt werden, indem eine zweite Simulation einer vergleichbaren Situation mit den zuvor identifizierten Parameterwerten durchgeführt wird. Für den Vergleich wird ein zweiter empirischer Datensatz verwendet. Bei Überschreitung der Abweichung muss erneut bei der Kalibrierung begonnen werden. Ein validiertes Modell auf mikroskopischer Ebene für den Untersuchungsbereich liegt vor, wenn bei der Validierung die vorgegebene Abweichung nicht überschritten wird.

Bei der Kalibrierung und Validierung auf mikroskopischer Ebene wird in der Regel keines der zuvor vorgestellten Simulationswerkzeuge (vgl. Abschnitt 4.5) verwendet, sondern es

wird vorwiegend nur die Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens (vgl. Abschnitt 4.3) betrachtet.

Beispiele für diese Untersuchungen des Fahrzeugfolgeverhaltens stammen z. B. vom DLR Berlin [BKW04a], [BKW04b], von der Graduate School of Engineering der Hokkaido Universität (Japan) [RNA04], [RNK05] sowie dem Department of Transportation Engineering der Universität Neapel (Italien) [PS05].

Das Vorgehen der Kalibrierung und Validierung in diesen Arbeiten ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

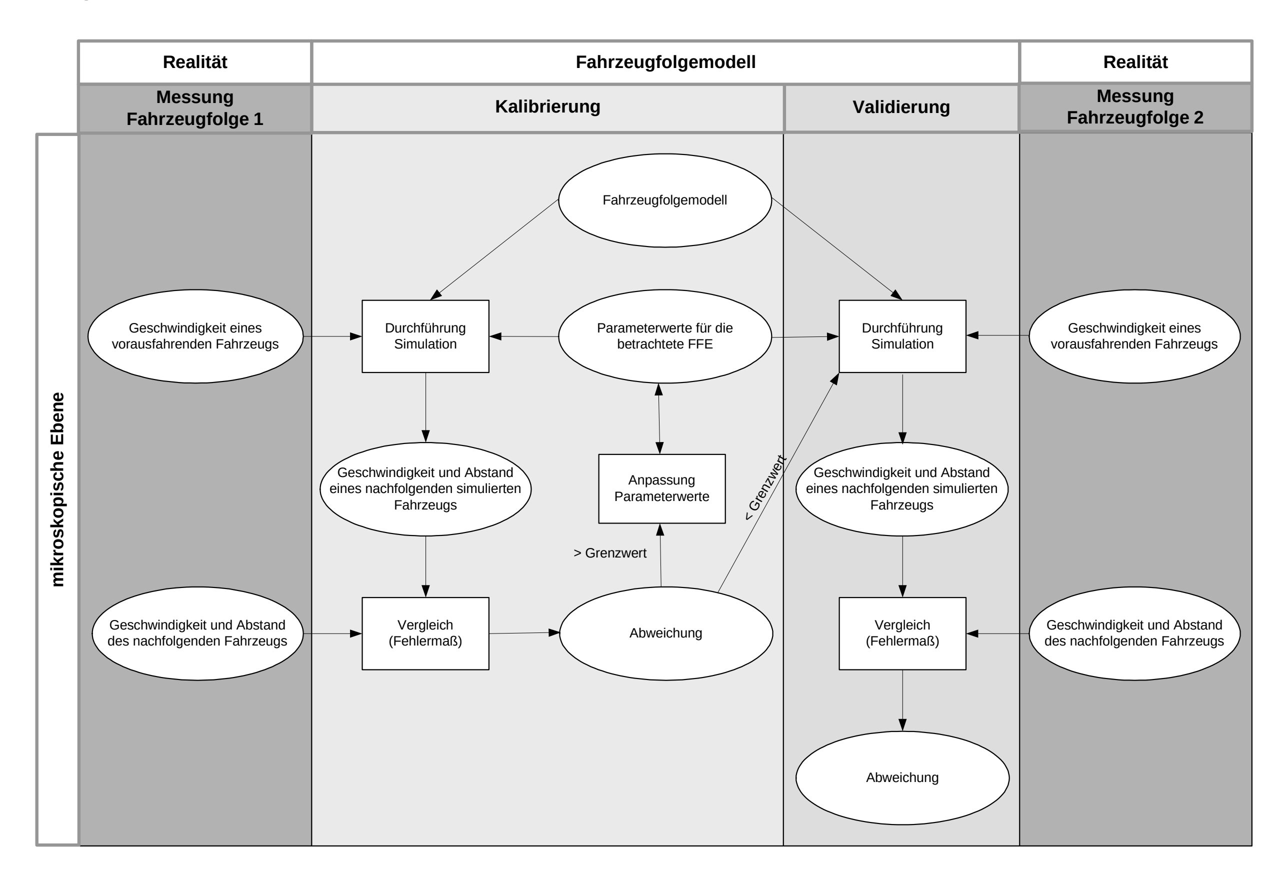


Abbildung 5.3: Mikroskopische Kalibrierung und Validierung eines Fahrzeugfolgemodells

Bei der Kalibrierung werden mit dem zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs einer empirischen Folgefahrt 1 und einem ersten Satz an Parameterwerten die Geschwindigkeit und der Abstand eines nachfolgenden Fahrzeugs simuliert. Der Vergleich durch die Bestimmung eines Fehlermaßes für die Kenngrößen Geschwindigkeit und bzw. oder Abstand wird mit den empirisch aufgezeichneten Messdaten des nachfolgenden Fahrzeugs der Folgefahrt 1 durchgeführt. Manuell oder mit einem Optimierungsverfahren werden die Parameterwerte angepasst, die Simulation wird dann erneut durchgeführt und das Fehlermaß wird bestimmt. Diese Iteration findet solange statt, bis entweder die durch das Fehlermaß bestimmte Abweichung einen vorher festgelegten Grenzwert unterschritten hat, bis eine zuvor bestimmte Anzahl an Iterationen durchgeführt wurde oder bis ein Minimum gefunden wurde.

Für die Validierung werden mit den identifizierten Parameterwerten und dem zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs einer empirischen Folgefahrt 2 ebenfalls die Geschwindigkeit und der Abstand eines nachfolgenden Fahrzeugs

simuliert. Eine Bewertung des Simulationsmodells wird anhand der Abweichung zwischen Simulation und empirischer Folgefahrt 2 durchgeführt.

Bei Verwendung von n Folgefahrten wird die Validierung dabei in der Art durchgeführt, dass die Parameter für alle n Folgefahrten mit oben beschriebener Kalibrierung bestimmt werden und anschließend die für eine Folgefahrt identifizierten Parameter für alle anderen Folgefahrten $n-1$ angewendet werden und das Fehlermaß erneut berechnet wird. Dieses wird für alle n Folgefahrten durchgeführt. Die Aussage hieraus ist, wie gut das Modell mit einem identifizierten Parametersatz für eine Folgefahrt auch die anderen $n-1$ Folgefahrten abbilden kann.

Das DLR Berlin [BKW04a], [BKW04b] untersuchte zehn unterschiedliche Fahrzeugfolgemodelle unter Betrachtung nur eines Fahrstreifens. Die verwendeten Simulationsmodelle besitzen dabei zwischen vier und 15 einzustellende Parameter. Unter den Modellen sind auch die bekannten Ansätze von Fritzsche, Gipps, Nagel und Schreckenberg sowie Yang and Koutsopulus. Die verwendeten Messdaten wurden auf einem Rundkurs in Hokkaido (Japan) mit neun Fahrzeugen aufgenommen. Für die Kalibrierung und Validierung wird als Kenngröße der Fahrzeugabstand und als Fehlermaß ein prozentualer Fehler, der dem mittleren absoluten prozentualen Fehler ähnelt (siehe Abschnitt 9.1), verwendet. Die Kalibrierung wird mit dem Verfahren der „downhill simplex method“ durchgeführt. Der Wert für das Fehlermaß nach der Kalibrierung beträgt zwischen ca. 13 % und 19 %. Die ermittelten Fehlermaße bei der Validierung nach dem oben beschriebenen Schema liegen etwa sechs Prozent höher als bei der Kalibrierung, wobei der Wert geringere Zuwächse bei der Validierung mit Datensätzen desselben Fahrers zeigt. Die Autoren können in ihrer Untersuchung kein am besten geeignetes Modell zur Nachbildung des Fahrzeugfolgeverhaltens bestimmen.

In den Arbeiten von der Graduate School of Engineering der Hokkaido Universität (Japan) [RNA04], [RNK05] werden acht Fahrzeugfolgemodelle untersucht. Es werden dabei nicht alle Parameter der Modelle in die Kalibrierung einbezogen, sondern nur zwischen zwei und vier Parameter. Unter den Modellen sind die Ansätze von Chandler, Gipps, Krauss sowie von Nagel und Schreckenberg. Die verwendeten Messdaten wurden mit zehn Fahrzeugen ebenfalls auf dem Rundkurs in Hokkaido (Japan) aufgenommen. Als Kenngrößen werden der Abstand, die Fahrzeuggeschwindigkeit als auch die -beschleunigung verwendet. Das Fehlermaß entspricht dem in der Arbeit vom DLR Berlin verwendeten Fehlermaß. Für die Identifikation der optimalen Parameter in der Kalibrierung wird ein genetischer Algorithmus verwendet. Der ermittelte Fehlerwert beträgt über alle Modelle betrachtet nach der Kalibrierung für den Abstand als verwendete Kenngröße zwischen ca. 12 % und 21 %, für die Geschwindigkeit zwischen ca. 3 % und 5 % und für die Beschleunigung zwischen ca. 52 % und 65 %. Eine Validierung ist in den Veröffentlichungen nicht beschrieben.

Das Department of Transportation Engineering der Universität Neapel (Italien) untersucht in der genannten Arbeit [PS05] vier mikroskopische Fahrzeugfolgemodelle mit zwei bis elf einzustellenden Parametern. Untersucht werden dabei u. a. das Modell von Gipps sowie das zweite in MITSIMLab implementierte Modell von Ahmed. Die Messdaten wurden im realen Verkehr mit vier in Kolonne fahrenden Fahrzeugen in der Umgebung von Neapel aufgenommen. Als Kenngrößen wird der Abstand, die Zeitlücke als auch die Geschwindigkeit untersucht. Als Fehlermaß wird der mittlere quadratische prozentuale Fehler betrachtet und Theil's U bestimmt (siehe Unterabschnitt 9.1.6). Für die Optimierung wird ein „multipoint nonlinear optimization algorithm“ verwendet.

Die Autoren ermitteln zuerst, dass der Abstand die verlässlichste Größe zur Kalibrie-

rung von Verkehrssimulationsmodellen ist, und verwenden diesen daher für die Kalibrierung. Die Autoren erklären auch den im vorherigen Absatz dargestellten Sachverhalt, dass der Kalibrierungsfehler bei Verwendung von Geschwindigkeiten viel niedriger ist als bei der Verwendung von Abständen. Eine Abweichung in den Geschwindigkeiten zwischen Simulation und Realität zu einem Zeitschritt hat ebenfalls eine Abweichung in den Abständen der Fahrzeuge in diesem Zeitschritt zur Folge. Da diese Abstandsabweichung auch in allen folgenden Zeitschritten erhalten bleibt, ist es oft einfacher, die Kalibrierung mit Geschwindigkeiten durchzuführen. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Kalibrierung mit Geschwindigkeiten „definitely does not imply a better reproduction of real dynamics" [PS05]. In der Untersuchung liegt der prozentuale Fehler nach der Kalibrierung zwischen ca. 7 % und 24 %. Für die Validierung werden Messfahrten von zwei aufeinanderfolgenden Tagen verwendet, wobei stets derselbe Fahrer betrachtet wird. Der prozentuale Fehler bei der Validierung liegt zwischen ca. 14 % und 42 % mit einem Mittelwert von ca. 23 %.

Die oben vorgestellten Arbeiten hatten das Ziel einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Fahrzeugfolgemodellen durchzuführen. Kesting nutzt in seiner Dissertation [Kes08] mikroskopische Einzelfahrzeugdaten, um das in seiner Arbeit entwickelte Fahrzeugfolgemodell (Intelligent Driver Modell (IDM)) zu kalibrieren und validieren. Hierzu verwendet der Autor Messdaten von drei Folgefahrten, die 1995 mit einem Versuchsfahrzeug auf einer nahezu geraden einstreifigen Stadtstraße in Stuttgart aufgenommen wurden. Als Kenngröße wird der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug verwendet. Kesting betrachtet in seiner Arbeit drei Fehlermaße: den mittleren quadratischen prozentualen Fehler, den mittleren quadratischen Fehler als auch eine Kombination der beiden Erstgenannten. Die Optimierung während der Kalibrierung wird mit einem genetischen Algorithmus durchgeführt. Der quadratische prozentuale Fehler nach der Kalibrierung beträgt für die drei betrachteten Folgefahrten 18,0 %, 24,1 % und 28,7 %. Der Fehler bei der Validierung ist nur für das kombinierte Fehlermaß angegeben. Dieser beträgt zwischen 26,9 % und 41,2 %.

Eine umfangreiche Untersuchung zur Kalibrierung von mikroskopischen Fahrzeugfolgemodellen beschreiben Ossen und Hoogendoorn [OH08]. Sie untersuchen für die Modelle von Gipps und Tempere die Auswirkung der Wahl des Fehlermaßes, der verwendeten Kenngröße sowie von Fehlern in den Messdaten auf das Kalibrierungsergebnis. Als Fehlermaß werden der mittlere absolute Fehler und der mittlere quadratische Fehler sowie jeweils deren prozentualen Umsetzungen verwendet. Außerdem wird Theil's U als Fehlermaß verwendet. Als Kenngrößen verwenden sie die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Fahrzeugposition und den Fahrzeugabstand. Für ihre Untersuchungen nutzen sie Folgefahrtdaten, die sie synthetisch erzeugt haben. Hierzu haben sie eine Trajektorie von einem Führungsfahrzeug angenommen und mit den Modellen von Gipps und Tempere jeweils das nachfolgende Fahrzeug simuliert. Mit der Kenntnis der verwendeten Parameterwerte für diese Simulationen bewerten sie anschließend, wie gut der Optimierungsalgorithmus in Abhängigkeit der oben genannten Kriterien die verwendeten Parameterwerte identifizieren kann. Für den Fall, dass Fehler in die Messdaten eingestreut worden sind und die Geschwindigkeit als alleinige Kenngröße verwendet wird, kann der Optimierungsalgorithmus für das Gipps-Modell nicht die verwendeten Parameterwerte identifizieren. Dieser Umstand kann umgangen werden, indem im Fehlermaß zwei Kenngrößen berücksichtigt werden. Die Autoren empfehlen daher grundsätzlich ein kombiniertes Fehlermaß, das zwei Kenngrößen einschließt, zu verwenden.

Bei der Betrachtung der oben genannten Untersuchungen ist anzumerken, dass ein Teil

der verwendeten Messdaten nicht im realen Straßenverkehr aufgenommen wurden. So schreiben die Autoren von [RNK05] zu ihren Ergebnissen: "...we would like to emphasize that these results are based on some particular driving conditions tested in the test track that might not necessarily represent real world driving behavior."

Bei der Durchsicht der Untersuchungen fällt ebenfalls auf, dass stets Folgefahrten von mehreren Minuten Dauer verwendet werden. In den Untersuchungen vom DLR Berlin ist keine genaue Dauer angegeben, aufgrund der dargestellten Abstandstrajektorien kann aber von mehreren Minuten Dauer ausgegangen werden. In der Untersuchung der Universität Neapel sind die dargestellten Folgefahrten zwischen ca. 180 s und 350 s lang. Die drei Folgefahrten, die Kesting in seiner Dissertation verwendet, haben eine Dauer von 250 s, 300 s sowie 400 s. Die dargestellten Folgefahrten in der Untersuchung von Ossen und Hoogendoorn sowie in der Dissertation von Ossen [Oss08] sind zwischen ca. 215 s und 360 s lang. Eine Ausnahme bildet die Kalibrierung des Modells in der Dissertation von Toledo [Tol03], in der die Fahrzeuge, deren Verhalten untersucht wird, aufgrund des verwendeten Messverfahrens im Schnitt nur 35,4 s beobachtet werden.

Neben der Dauer der Folgefahrten fällt der untersuchte Geschwindigkeitsbereich auf. Dieser beträgt für alle genannten Untersuchungen zwischen 0 km/h und maximal ca. 80 km/h. In der Dissertation von Kesting ist die Maximalgeschwindigkeit sogar nur 60 km/h. Zusätzlich sind in allen betrachteten Folgefahrten mehrere Stopps mit entsprechenden Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen enthalten. Ausnahme bilden die 1997 in Großbritannien durchgeführten Folgefahrten in [BSM02] mit Geschwindigkeiten bis ca. 120-130 km/h.

Problematisch bei der Durchführung einer mikroskopischen Kalibrierung ist häufig, dass dem Anwender keine geeigneten Messdaten zur Verfügung stehen, sodass Messdaten aus verfügbaren Quellen verwendet werden müssen. Bei der Verwendung von Messdaten aus fremden Quellen ist sicherzustellen, dass die in Abschnitt 5.1 dargestellte notwendige Vergleichbarkeit der Messdaten mit dem Untersuchungsgegenstand für die Kalibrierung und Validierung gegeben ist. So haben die Untersuchungen von Punzo und Simonelli [PS05] aufgezeigt, dass eine Vergleichbarkeit der Daten für innerstädtische und außerstädtische Fahrten nicht angenommen werden kann. Im folgenden Unterabschnitt 5.2.3 werden weitere Arbeiten genannt, in denen dem Anwender keine geeigneten mikroskopischen Messdaten zur Verfügung standen. In diesen Arbeiten verzichtete der Anwender aufgrund der fehlenden Messdaten auf eine Betrachtung der mikroskopischen Ebene.

Bewertung des Ansatzes I

Abschließend wird hier eine Bewertung des Ansatzes I hinsichtlich der Eignung zur Untersuchung von VAS vorgenommen werden. In Abschnitt 3.3 wurde ermittelt, dass eine bloße Betrachtung auf mikroskopischer Ebene bzw. nur eine Betrachtung des Fahrzeugfolgemodells dem Anwendungsfall des Nachweises der Eignung von VAS für den Straßenverkehr nicht gerecht wird. Die Anforderungen zur Untersuchung von VAS gehen über die valide mikroskopische Abbildung hinaus. In den oben dargestellten Arbeiten werden lediglich isolierte FFE betrachtet, sodass nicht deutlich wird, welchen Effekt diese im Gesamtmodell auf die makroskopischen Kenngrößen wie Verkehrsstärke oder mittlere lokale Geschwindigkeit haben.

Auch Krauß schreibt in seiner Arbeit [Kra98], dass eine Kalibrierung der Fahrzeugfolge wenig Aussagekraft zur makroskopischen Abbildungsgenauigkeit hat.

> „Apart from this it is important to note that model performance on this microscopic level is not very meaningful with respect to the model properties on a macroscopic scale. For example, the dynamics of jam formation in the Wiedemann model is, in contrast to that of the model proposed here, quite unrealistic, although it performs slightly better in the car following experiment. On this background the common practice to judge the validity of a model from car following experiments appears doubtful.“

Damit ist dieser Ansatz geeignet, sicherzustellen, dass die Unterschiede des Fahrzeugfolgeverhaltens von Mensch und VAS valide abgebildet werden, allerdings ist dieser Ansatz nicht dafür geeignet, die Verbesserung des Verkehrsflusses zu bewerten.

5.2.2 Kalibrierung und Validierung nach Ansatz II

Mit einem mikroskopischen Verkehrssimulationsmodell ist auch eine Kalibrierung und Validierung auf makroskopischer Ebene möglich. Dieses ist das häufigste Vorgehen bei der Verwendung der bedeutendsten Verkehrssimulationswerkzeuge (vgl. Abschnitt 4.5). Abbildung 5.4 zeigt das entsprechende Vorgehen zur Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells auf makroskopischer Ebene. Es wird wie in Unterabschnitt 5.2.1 mit der nicht kalibrierten mikroskopischen Simulation begonnen. In diesem Fall werden jedoch nicht ausgewählte mikroskopische simulierte Kenngrößen anhand eines Fehlermaßes mit den empirischen Kenngrößen verglichen, sondern in diesem Ansatz findet eine Aggregation der mikroskopischen Simulationsergebnisse statt. Anschließend werden die Werte der simulierten aggregierten und damit makroskopischen Kenngrößen mit den Werten der empirischen makrokopischen Kenngrößen verglichen. Das weitere Vorgehen ist vergleichbar mit dem in Unterabschnitt 5.2.1 beschriebenem Vorgehen, wobei stets nur die makroskopischen Kenngrößen Berücksichtigung finden. Als Ergebnis dieses Ansatzes liegt ein auf makroskopischer Ebene valides Simulationsmodell vor.

Eine bekannte Anleitung zur Durchführung der Kalibrierung und Validierung nach Ansatz II ist die Darstellung in [HMK03]. Die Autoren schlagen vor, zuerst eine verkehrsstärkebasierte Kalibrierung durchzuführen. Als Fehlermaß werden die Fehlermaße mittlerer quadratischer prozentualer Fehler, Korrelationskoeffizient r und Theil's U (vgl. Abschnitt 9.1) genannt. Die Autoren schreiben:

> „The behavior of the actual system is usually defined in terms of measurable traffic variables such as volumes, speeds, occupancies, queue lengths, etc., which for practical purposes are measured by detectors or observed manually. To validate the simulation model, the simulator should be able to emulate actual measurements and produce a series of matching simulated values.“

Daher werden als Kenngrößen im Gegensatz zu Ansatz I die Verkehrsstärke und die mittlere lokale Geschwindigkeit für ausgewählte Orte verwendet. Im ersten Schritt sollen globale Parameter der Fahrzeuge, wie Wunschgeschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung

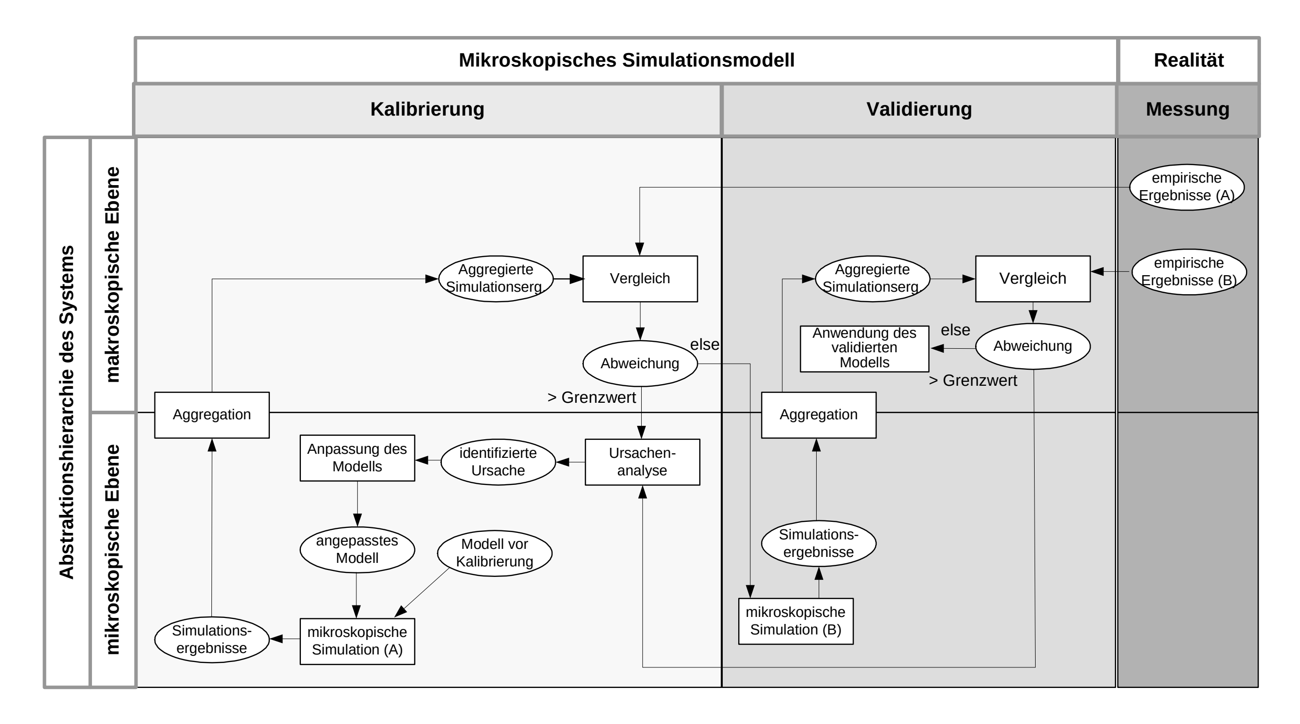


Abbildung 5.4: Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells nur auf makroskopischer Ebene

eingestellt werden. In einem zweiten Schritt sollen die durchschnittlichen Geschwindigkeiten auf den Messabschnitten und die bekannten Engstellen („bottlenecks") durch Kalibrierung im Verkehrsmodell wiedergegeben werden. In diesem Schritt sollen insbesondere lokale Geschwindigkeitsbegrenzungen angepasst werden, aber auch die globalen Parameter aus Schritt eins einer Feinanpassung („fine-tuning") unterzogen werden. Es wird vorgeschlagen, lokale Geschwindigkeitsbegrenzungen zu erhöhen, um falsche Engstellen aufzulösen, und die lokalen Geschwindigkeitsbegrenzungen zu erniedrigen, um in der Simulation nicht auftretende Engstellen zu kreieren. Eine Feinanpassung der globalen Parameter von Fahrzeuggeschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung kann ebenfalls zu einer Übereinstimmung mit den beobachteten Geschwindigkeiten auf einem Streckenabschnitt beitragen. Aus dem beschrieben Vorgehen wird ersichtlich, dass es nicht das Ziel ist, eine Übereinstimmung des Verhaltens der einzelnen simulierten FFE mit der Wirklichkeit zu erreichen.

Eine Anleitung zur Durchführung einer Kalibrierung und Validierung nach Ansatz II liefert auch die bereits in Abschnitt 5.1 genannte Traffic Analysis Toolbox [DSA04] sowie die darauf basierende Zusammenfassung in [DSA04]. Die Vorgehensweise wurde bereits in Abbildung 5.1 dargestellt. Als Fehlermaß wird nur der mittlere quadratische Fehler genannt. Die Autoren nennen als Kenngrößen für die Kalibrierung die Verkehrsstärke, Reisezeiten, mittlere Geschwindigkeiten und die Länge von Fahrzeugschlangen. Die Berücksichtigung von mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten wird in diesem Handbuch nicht behandelt.

Die Beschreibung eines im Rahmen des California Path Programms entwickelten Werkzeugs zur Kalibrierung von mikroskopischen Simulationsmodellen in [ZJ08], [ZJD08] verwendet einen vergleichbaren Ansatz wie die oben dargestellte Anleitung von [HMK03]. Das Vorgehen beruht ebenfalls auf der Kalibrierung der globalen und anschließend der lokalen Parameter. Das beschriebene Vorgehen ist aber deutlich umfangreicher, da auch Phasen

vor der Kalibrierung betrachtet werden und die Kalibrierung auch die „departure/route (D-R) choice parameter calibration“ berücksichtigt. Die Motivation für die Arbeit beruht auf der Erkenntnis, dass „model calibration is the weakest link in all application categories“ [ZJ08]. Die Autoren schreiben, „...it is the macro scale measurements that we are mostly interested in such studies, not the minute details of vehicle movements, ... “ [ZJ08]. Daher nennen die Autoren auch nur makroskopische Kenngrößen wie Reisezeiten, Länge von Fahrzeugschlangen oder die Verkehrsstärke.

Harding [Har07] erhebt in seiner Dissertation mit einem Versuchsfahrzeug Messdaten von Fahrzeugfolgefahrten und verwendet diese für eine Bewertung von bisherigen Ansätzen mikroskopischer Fahrzeugfolgemodelle. Anschließend entwirft der Autor ein neues mikroskopisches Modell zur Beschreibung des Verkehrsflusses auf Autobahnen. Die Kalibrierung und Validierung seines neuen Modells nimmt er aber ausschließlich mit makroskopischen Daten vor. Dabei betrachtet er 5-Minuten-Intervalle von Verkehrsstärke und mittlerer lokaler Geschwindigkeit. Soweit dem Autor die Messdaten vorliegen, arbeitet er mit fahrstreifenbezogenen Daten. Als Fehlermaß verwendet er die aus Ansatz I bereits bekannten Fehlermaße. Die Parameteranpassung wird nach dem „Trial and Error“-Prinzip manuell „basierend auf der sachkundigen Einschätzung des Bearbeiters vorgenommen“. Der Autor schreibt in seiner Arbeit, dass „auch noch andere Parameterkombinationen denkbar [sind], mit denen eine gleich gute oder bessere Anpassung der Simulation an die empirischen Daten erreicht werden.“ Dies bedeutet aber auch, dass nach der Kalibrierung und Validierung kein valides mikroskopisches Modell vorliegen kann. Ein Nachweis wäre mit den verwendeten Messdaten auch nicht möglich, da die zuerst genannten mikroskopischen Messdaten der Fahrzeugfolge von einem anderen Streckenabschnitt und einem anderen Erhebungszeitraum stammen als die verwendeten makroskopischen Messdaten.

Die Autoren von [VMS08] entwickeln in ihrer Arbeit ein Verfahren, in dem abweichend von dem bisherigen Vorgehen bei der Kalibrierung nicht die Minimierung eines der bekannten Fehlermaße angestrebt wird. Die Neuheit des Verfahrens zeichnet sich dadurch aus, dass die Form und Lage der Punktwolken der empirischen und simulierten q-v-Beziehung in Übereinstimmung gebracht werden sollen. Als Optimierungsverfahren wird dazu ein evolutionärer Algorithmus verwendet. Die notwendigen makroskopischen Daten von mittlerer lokaler Geschwindigkeit und Verkehrsstärke wurden an vier Messquerschnitten des Highways US-101 in Kalifornien erhoben und für die Kalibrierung verwendet. Bei der Kalibrierung passen sie fünf Parameter des Fahrzeugfolgemodells des Simulationswerkzeugs VISSIM an. Laut Autorenaussage erhalten sie für drei Parameter Werte, die den im Werkzeug eingestellten Defaultwerten entsprechen. Für die zwei verbleibenden Parameter ziehen sie mikroskopische Daten für den gleichen Streckenabschnitt aus dem NGSIM-Projekt [NGS09] hinzu. Sie stellen fest, „dass die aus dem makroskopischen q-v-Diagramm abgeleiteten Parameter des Simulationsmodells gut mit den über die mikroskopischen Trajektoriendaten beobachtbaren Oszillationsprozessen zusammenpassen, ... “.

In der Arbeit wurde die Kalibrierung der makroskopischen q-v-Beziehung anhand von fünf Parametern des Fahrzeugfolgemodells vorgenommen ohne Berücksichtigung des Fahrstreifenwechselverhaltens. Die Annahme, dass aus der makroskopischen Kalibrierung die Parameter für das mikroskopische Verhalten bestimmt werden können, setzt nach Aussage der Autoren „die qualitative Korrektheit des darunter liegenden Verhaltensmodells voraus, sowie die Annahme, dass innerhalb sinnvoller Wertebereiche die Abbildung der Modellparameter auf das resultierende q-v-Diagramm eindeutig ist“ [VMS08]. Die Autoren erklären nicht, wieso hierfür die qualitative Korrektheit ausreichend sein soll, da für eine valide

mikroskopische Abbildung auch die quantitative Korrektheit gegeben sein sollte. Des Weiteren wurde von den Autoren der Nachweis dieser eindeutigen Abbildung, insbesondere für den Fall, dass auch das Fahrstreifenwechselverhalten berücksichtigt wird, nicht erbracht. Die Autoren von [Tra06] schreiben:

> „So kann das Modell einerseits auf makroskopischer Ebene durchaus plausible und realistische Ergebnisse erzeugen, z. B. in Form von Fundamentaldiagrammen, und somit auf dieser Ebene valide sein. Andererseits ist damit nicht sichergestellt, dass dieses Modell auch auf der mikroskopischen Ebene valide Ergebnisse liefert. So kann es durchaus möglich sein, dass die Anzahl der Fahrstreifenwechselvorgänge nicht der Realität entspricht."

Betrachtet man sich das Vorgehen der Autoren im Detail handelt es sich dabei sogar um eine weitere Aggregation der bereits aggregierten Messdaten. Bisherige Ansätze zur makroskopischen Kalibrierung und Validierung verglichen den zeitlichen Verlauf z. B. von Verkehrsstärke oder mittlerer lokaler Geschwindigkeit aus Simulation und Empirie. Im Ansatz dieser Autoren wird allerdings beim durchgeführten Vergleich der zeitliche Verlauf der Messdaten nicht mehr berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Veröffentlichungen zur Entwicklung von mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen ist festzustellen, dass diese Modelle zwar auf mikroskopischen Modellannahmen basieren, aber einige Modelle nicht die Zielsetzung haben, das mikroskopische Einzelfahrzeugverhalten valide abzubilden. Vielmehr ist es deren Ziel, nur den makroskopisch beobachtbaren Verkehrsfluss wiederzugeben. Beispiele hierfür sind z. B. das Modell von Nagel und Schreckenberg oder das Modell von Krauss.

Das Modell von Nagel und Schreckenberg hat als mikroskopisches Modell aufgrund seines einfachen Aufbaus das Ziel, ein sehr großes Verkehrsnetz in kurzer Zeit simulieren zu können, ohne die Zielsetzung zu verfolgen, das mikroskopische Verhalten valide abzubilden. Die Autoren von [Tra06] schreiben zu den Zellularautomaten:

> „Dies bewirkt auf mikroskopischer Betrachtungsebene u.a. unrealistische Beschleunigungen, die typischerweise unsinnig groß sind. Deshalb ist bei der Auswahl des Simulationsmodells darauf zu achten, dass durch die Abstraktion nicht wesentliche Eigenschaften des Untersuchungsgegenstandes ausgeblendet werden."

Krauss schreibt zu seinem vorgeschlagenen Modell [Kra98]:

> „Our main interest will be focused on the qualitative macroscopic properties of the model proposed here, because one cannot really expect to be able to capture the microscopic details of vehicle motion correctly with a model of this simple structure."

Obwohl Krauss ein mikroskopisches Modell entwickelt, legt er also keinen besonderen Wert auf das mikroskopische Verhalten der Fahrzeuge, sondern hat das Ziel die qualitativen makroskopischen Eigenschaften abzubilden. Diese Zielsetzung geht aus den Anforderungen an Simulationsuntersuchungen zum damaligen Zeitpunkt hervor, die den Fokus auf die makroskopische Ebene legten. Die Autoren von [KWG97] schreiben hierzu:

> „When describing freeway traffic, one is hardly ever interested in the way individual cars move, but rather in the macroscopic properties of the system, meaning the properties that are expressed as probability distributions or averages taken over many cars.“

Es kann sogar bei der Kalibrierung und Validierung von mikroskopischen Verkehrssimulationsmodellen mit makroskopischen Kenngrößen vorkommen, dass die Werte für die Parameter wie z. B. Höchstgeschwindigkeit, maximale Beschleunigung und Bremsverzögerung oder die Fahrzeuglänge „in einem gegebenen [mikroskopischen] Modell nicht immer realistischen Werten entsprechen müssen“ [Tra06]. Die Autoren von [Tra06] verweisen auf Arbeiten, in denen die Beschleunigung auf unrealistische Werte eingestellt werden musste, um die makroskopischen Ausgabegrößen des Modells mit Realdaten in Übereinstimmung zu bringen. Dabei merken die Autoren an, dass „Modellergebnisse, die von der Detaillierungsebene gewonnen werden, auf welcher der unrealistische Parameter gewählt wurde, besonders kritisch zu hinterfragen [sind].“

Kerner beschreibt in seinem Buch [Ker04] die simulativ ermittelte Auswirkung von ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss. Hierzu stellt der Autor zuerst zwei Ansätze für mikroskopische Simulationsmodelle vor, die auf der vom Autor propagierten 3-Phasen-Theorie aufbauen. Da das Ziel des Buches die Erklärung von Phasenübergängen im Verkehr und zeitlich-räumlichen Staumustern ist, werden die Parameter der Modelle so gewählt, dass diese empirischen Staumuster (beschrieben durch makroskopische Kenngrößen) in der Simulation möglichst gut abgebildet werden. Obwohl der Autor bei der Entwicklung seines Modells nicht die detaillierte Bewegung von durch den Menschen gesteuerten Einzelfahrzeugen betrachtet hat, untersucht er in einem späteren Kapitel seines Buches den Einfluss von ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss, indem er die Regelung der Fahrzeuglängsbewegung der mit ACC ausgestatteten Fahrzeuge definiert. Folglich kann nicht von einer validen Abbildung der Unterschiede zwischen Mensch und System ausgegangen werden, die für eine quantitative Aussage der Auswirkung von ACC-Systemen notwendig ist.

Bewertung des Ansatzes II

Zusammenfassend werden im Ansatz II ausschließlich Kenngrößen verwendet, die das Verkehrsverhalten in aggregierter Form abbilden, das sich aus der Interaktion der Einzelfahrzeuge ergibt. Das Problem in diesem Ansatz liegt darin, dass diese aggregierten Größen keinerlei Aussage über das individuelle Fahrverhalten zulassen. Es ist möglich, dass unterschiedliche Parameterkombinationen und damit einhergehend ein unterschiedliches mikroskopisches Einzelfahrzeugverhalten zu einem identischen makroskopisch beobachtbaren Verkehrsfluss führen kann. Bei der Kalibrierung und Validierung nach Ansatz II ist es nur das Ziel, eine dieser möglichen Parameterkombinationen zu identifizieren. Das detaillierte mikroskopische Verhalten der FFE, geschweige denn die Validität seiner Abbildung im Simulationsmodell, wird bei diesem Vorgehen nicht beachtet. Es wurde festgestellt, dass einige Modelle bereits bei der Modellentwicklung nicht das Ziel hatten, das mikroskopische Einzelfahrzeugverhalten wiederzugeben. Soll auf mikroskopischer Ebene eine Aussage getroffen werden, ist sicherzustellen, dass das Modell auch auf mikroskopischer Ebene valide ist. Interpretiert man die Aussage von Krauss [Kra98], “each model has got its specific

range of application, for which it has been designed, but little is generally known about the actual range of validity that a model has“, ist dieses aber häufig gar nicht möglich.

Der Ansatz der Kalibrierung und Validierung mit ausschließlich makroskopischen Kenngrößen ist damit nicht geeignet, die Anforderungen zur Untersuchung eines VAS zu erfüllen.

5.2.3 Kalibrierung und Validierung nach Ansatz III

Neben der getrennten Betrachtung von mikroskopischer und makroskopischer Ebene ist auch eine integrierte Betrachtung beider Ebenen denkbar. Bereits 1994 beschreiben Brackstone und McDonald in [BM94] den Grundgedanken einer mikroskopischen Kalibrierung und makroskopischen Validierung im Rahmen der Erklärung der Begriffe Kalibrierung und Validierung:

> „This should ideally be undertaken at both a macroscopic scale (validation) to ensure the overall behaviour of the model matches that readily observable, but also at a microscopic scale, with regard to individual vehicle-vehicle interactions (the calibration, and „tuning“ of the many behavioural parameters comprising the decision making processes).“

Das entsprechende Vorgehen zeigt Abbildung 5.5. Es wird mit einer mikroskopischen Simulation begonnen und das Modell mit den empirischen mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten kalibriert. Nach Abschluss der Kalibrierung wird mit den makroskopischen Ergebnissen derselben Simulation die Validierung auf makroskopischer Ebene mit den empirischen makroskopischen Daten durchgeführt.

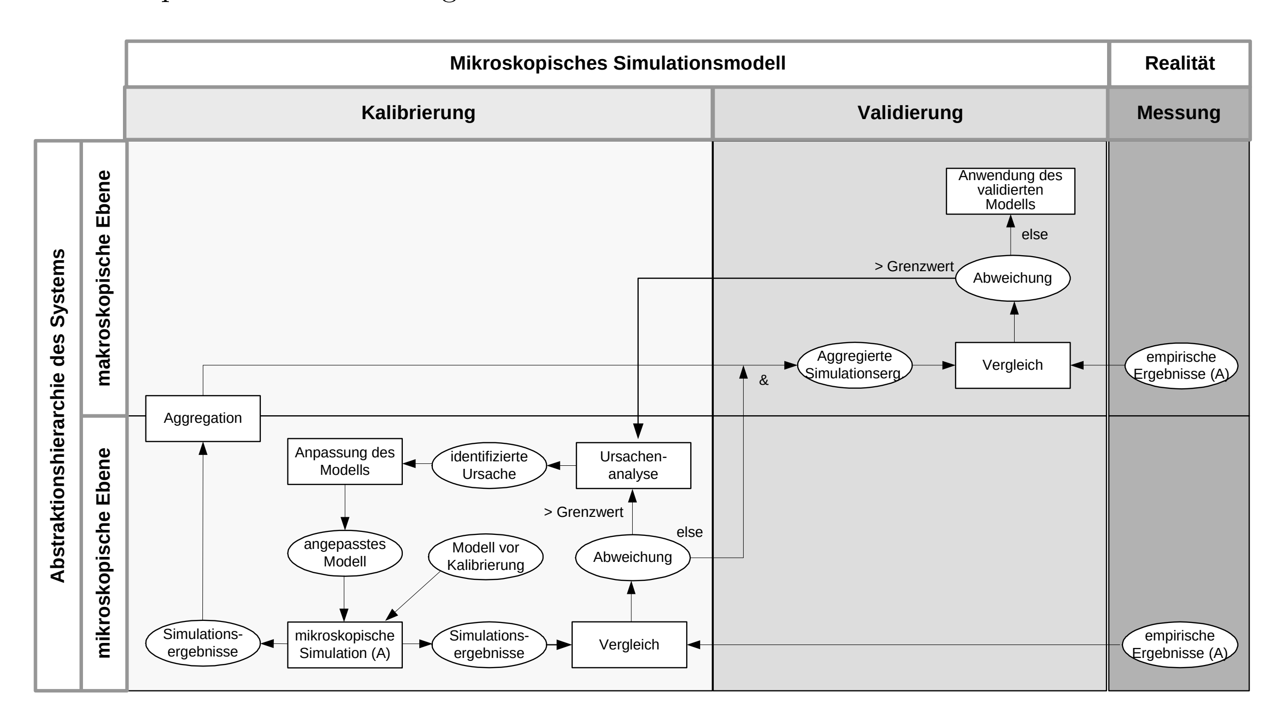


Abbildung 5.5: Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene

Einen Ansatz in die Richtung der Betrachtung von mikroskopischen und makroskopischen Größen machte Witte in seiner Dissertation [Wit96]. Er beschreibt in seiner Arbeit

die Durchführung einer mikroskopischen Kalibrierung mit anschließender makroskopischer Validierung. Die makroskopische Validierung führt Witte durch Simulation von 100 Pkws auf einer einstreifigen Kreisbahn für eine Simulationsdauer von 30 Minuten durch. Für einen Querschnitt der Kreisbahn ermittelt der Autor die Größen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere Geschwindigkeit für ein Aggregationsintervall von einer Minute. Witte schließt auf eine makroskopische Validität, da in der grafischen Darstellung von Verkehrsstärke über Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit über Verkehrsdichte „die bekannten typischen Zusammenhänge“ erkennbar sind, sowie der „Verlauf der Streuung der Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der eingeprägten mittleren Verkehrsdichte ... im Übergangsbereich vom teilgebundenen Verkehr zum gebundenen Verkehr ein deutliches Ansteigen [zeigt], wie es ... aufgrund empirischer Daten beschrieben wird.“ Damit beschränkt sich die Validierung auf eine rein qualitative Betrachtung. Ein detaillierter quantitativer Vergleich mit empirischen Messdaten wird nicht vorgenommen. Da Witte die Validierung anhand einer einstreifigen Kreisfahrbahn durchführt, werden Überhol- und Einfädelvorgänge nicht berücksichtigt. Witte merkt in seiner Arbeit an, dass er relativ große Verkehrsdichten und Verkehrsstärken in der Simulation erhält, welches er zum einen auf die Vernachlässigung von Lkws, zum anderen auf die zur Kalibrierung verwendeten Messdaten zurückführt.

Fellendorf und Vortisch präsentieren in [FV01] laut eigener Aussage die Möglichkeit, das mikroskopische Simulationsmodell von VISSIM auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene zu validieren. Im Abschnitt zur mikroskopischen Kalibrierung beziehen sich die Autoren auf eine Darstellung einer Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug und anschließender Folgefahrt, die mit VISSIM nachgebildet wurde. Hinzu kommt eine Beschreibung der Auswirkung der Änderung der Simulationsschrittweite auf das Simulationsergebnis. Da die eigentliche Kalibrierung in dem Aufsatz nicht beschrieben wird, gibt es auch keine Hinweise auf entsprechende verwendete mikroskopische Messdaten. Die Autoren schreiben: „Whether the car-following model is appropriately calibrated for a given situation can be checked by validating the simulation results on a macroscopic level.“ Damit entspricht dies dem bereits in Unterabschnitt 5.2.2 beschriebenen Ansatz, indem keine empirischen mikroskopischen Daten verwendet werden. Wie ausführlich in Unterabschnitt 5.2.2 dargestellt, folgt daraus im Gegensatz zur Aussage der Autoren, dass gerade keine Validität auf mikroskopischer Ebene angenommen werden darf. Als Beispiel zur Validierung auf makroskopischer Ebene verwenden die Autoren für die Simulation die Standardparameter für Autobahnen, die aus nicht näher spezifizierten Abstands- und Geschwindigkeitsmessungen gewonnen wurden, und vergleichen qualitativ Ergebnisse aus der Simulation mit empirischen Daten mithilfe der grafischen Darstellung von mittlerer Geschwindigkeit über Verkehrsstärke. In dieser Darstellung fehlt wie bereits bei Witte damit der zeitliche Bezug der simulierten und empirischen Messdaten. Eine quantitative Betrachtung wird nicht durchgeführt. In der Darstellung in [FV01] ist zu erkennen, dass die mittlere Geschwindigkeit in der Simulation stets niedriger als in den empirischen Daten ist. Für eine Untersuchung des VAS müsste diese Abweichung quantifiziert und analysiert werden. Die Daten zur Kalibrierung zur Gewinnung der Standardparameter scheinen nicht den gleichen Orts- und Zeitbezug zu haben, wie die dargestellten makroskopischen Daten. Die versprochene Validierung auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene konnte damit in dem Beitrag nicht gezeigt werden.

Die Autoren von [CLOR03] schlagen einen mehrstufigen Kalibrierungs- und Validierungsprozess auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene vor. Der nicht explizit ge-

nannte Schwerpunkt der Arbeit scheint zwar bei der Kalibrierung und Validierung der Modelle von „Origin-Destination (OD) estimation“ und „route choice“ zu liegen, dieser ist aber in den beschriebenen Gesamtprozess eingebettet. Zuerst kalibrieren die Autoren von [CLOR03] ihr Simulationsmodell auf mikroskopischer Ebene. Dabei wird sich in der oben genannten Arbeit auf eine vorherige Veröffentlichung bezogen. Zur Simulation wird PARAMICS verwendet. Für die „Mean Target Headway“ und die „Reaction Time“ werden Werte von 0,625 und 0,415 gefunden. Abweichend von der Darstellung in Abbildung 5.5 führen die Autoren nicht nur eine Kalibrierung auf mikroskopischer Ebene durch, sondern anschließend eine weitere Kalibrierung auf makroskopischer Ebene. Nach Abschluss des vollständigen mehrstufigen Kalibrierungsprozesses - auch auf makroskopischer Ebene - mussten die zuvor auf mikroskopischer Ebene identifizierten Werte für „Mean Target Headway“ auf 0,78 und die für „Reaction Time“ auf 0,66 korrigiert werden. Damit wurde der Wert für die „Mean Target Headway“ im Vergleich zum Wert nach der Kalibrierung des Folgeverhaltens um beinahe 25 % angehoben, der Wert der „Reaction Time“ ist sogar um 59 % größer als der zuvor bestimmte Wert. Wichtig an dieser Stelle ist es festzuhalten, dass eine Anpassung des mikroskopischen, bereits kalibrierten Folgeverhaltens notwendig war, um die Messwerte der makroskopischen Ebene nachzubilden. Demnach kann diese Simulation zur Untersuchung eines VAS nicht mehr verwendet werden, da das mikroskopische Verhalten durch die nachträgliche Parameteränderung ohne weitere Überprüfung als nicht mehr valide angesehen werden muss. Die Autoren von [CLOR03] erhoben keine eigenen Messdaten, sodass sie für ihre Untersuchung Messdaten aus unterschiedlichen Datenquellen verwendeten.

In [Tol03] und [Tol08] beschreibt ihr Autor Toledo die Entwicklung eines integrierten Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodells. Die Entwicklung basiert auf der Annahme, dass der Fahrer zur Erreichung kurzfristiger Ziele („short term goal“) einen kurzfristigen Plan („short term plan“) umsetzt. Das Vorgehen der Kalibrierung und Validierung zeigt Abbildung 5.6.

Die 71 Parameter seines Modells kalibriert der Autor mit einer Maximum-Likelihood-Schätzung. Das Ziel dabei ist den Parametersatz zu finden, der die Wahrscheinlichkeit der Wiedergabe des empirisch beobachteten Fahrverhaltens (in diesem Fall der empirisch beobachteten Beschleunigungen und Fahrstreifenwechsel) maximiert. Hierzu verwendet der Autor Messdaten aus dem Jahr 1983, aufgenommen auf einem 997 m langen Abschnitt des vierstreifigen Highways I-395 in Arlington (Virginia). Bei den Messdaten handelt es sich um Luftbildaufnahmen, die mit einer Bildfrequenz von 1 Hz für die Dauer von 1 h aufgenommen wurden. Da aus dem Bildmaterial nur die Fahrzeugpositionen direkt bestimmbar sind, müssen die Fahrzeuggeschwindigkeiten und Beschleunigungen durch Ableitung der Position bestimmt werden. Die betrachteten Fahrzeuge fahren im Mittel 15,6 m/s bei einer Standardabweichung von 3,1 m/s. Bevor der Autor die Validierung durchführt, führt er eine zweite Kalibrierung anhand aggregierter Messdaten (Zeitlücken, mittleren Geschwindigkeiten, Verkehrsstärke) durch, um ein „fine-tuning“ der zuvor bestimmten Parameter sowie die Kalibrierung von „general parameters“ vorzunehmen. Das Ziel dabei ist das „Refining previously calibrated parameter values for the specific site being studied.“ Das Ergebnis dieser zweiten Kalibrierung wird in den beiden oben genannten Arbeiten nicht beschrieben.

Anschließend führt der Autor die Validierung durch, indem er in der Simulation die Fahrzeuge exakt zu der empirisch bestimmten Zeit und dem bestimmten Fahrstreifen einfahren lässt. Als Validierungsgrößen wählt der Autor die Fahrzeiten der einzelnen Fahrzeuge sowie die Verteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Fahrstreifen. Die Abweichung bestimmt er

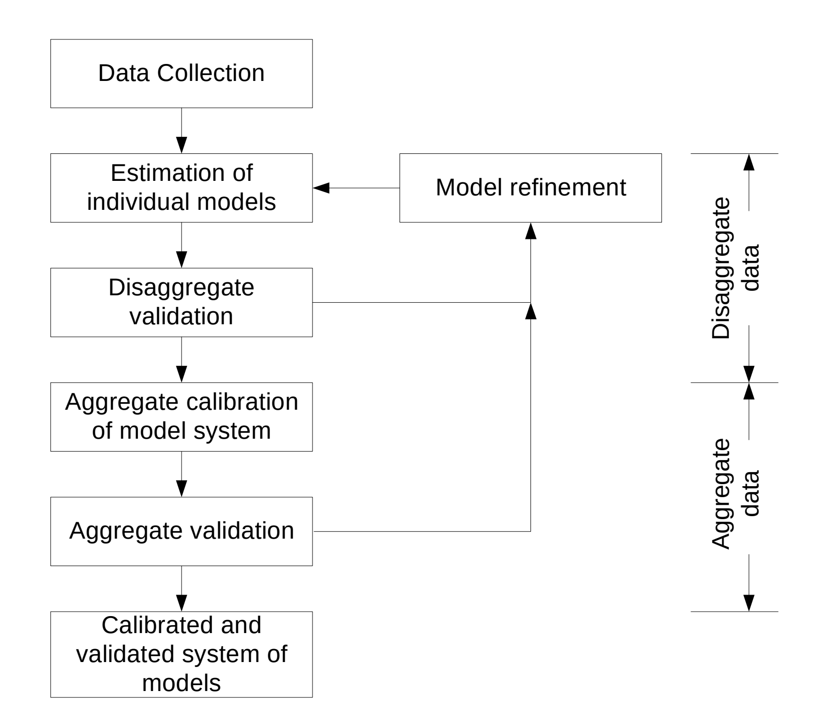


Abbildung 5.6: Overall Calibration Framework, aus [Tol03]

anhand mehrerer Fehlermaße. Die Ergebnisse sind in der Arbeit detailliert aufgelistet.

Der gewählte Ansatz von Toledo scheint grundsätzlich geeignet zur Untersuchung von VAS. Offene Fragen bei diesem Vorgehen sind die Notwendigkeit einer zweiten Kalibrierung (und der in der Arbeit nicht genannten Auswirkung auf die zuvor bestimmten Parameter), sowie die Auswirkung der Betrachtung eines nur sehr kleinen Streckenabschnitts von weniger als 1 km Länge. Lokale Einflüsse (Straßengeometrie, Fahrbahnbeschaffenheit, u.a.) können damit starken Einfluss auf das Fahrerverhalten und damit auf das Kalibrierungsergebnis haben. Die direkte Weiterverwendung der oben genannten Ergebnisse zur Untersuchung des VAS ist auch deswegen zu vermeiden, da die mehr als 25 Jahre alten Messdaten ggf. aufgrund geänderten Fahrer- und Fahrzeugverhaltens nicht mehr repräsentativ sind [Eve92], die Übertragbarkeit des untersuchten Verhaltens auf deutsche Autobahnen, Fahrer und Fahrzeuge nicht sichergestellt ist sowie nur ein Geschwindigkeitsbereich mit relativ niedrigen Geschwindigkeiten betrachtet wurde.

Die Problematik der verfügbaren Messdaten zeigt sich auch in den Arbeiten von Toledo und Koutsopoulos [TKD+03], [BADTK02], [BADT+00]. In den Veröffentlichungen wird eine Untersuchung einer Stadtautobahn im Norden von Stockholm mit dem Werkzeug MITSIMLab beschrieben. Sie stellen das im vorherigen Absatz beschriebene und in Abbildung 5.6 dargestellte zweistufige Verfahren vor. Da den Autoren für ihre Untersuchung nur aggregierte Daten vorliegen, wird die Kalibrierung und Validierung mit nicht aggregierten Daten im Rahmen dieser Veröffentlichungen nicht weiter betrachtet.

Das Ziel der Arbeit von [MMZ06] ist, ein „self-learning driving behaviour model for microscopic simulations“ zu entwerfen. Die Autoren sehen als Problem aktueller mikroskopischer Simulationsmodelle den „level of detail they want to present“ an. Sie schreiben weiter:

> „Mostly, the calibration of these models is based on macroscopic measurement data, like flow and speed, which says nothing about the accuracy of the

individual driving behavior of the vehicle-driver combinations."

Daher kalibrieren die Autoren ihr Simulationsmodell mit mikroskopischen Daten. Dabei verwenden sie sowohl Daten von mit Sensorik ausgestatteten Einzelfahrzeugen als auch als „remote sensing" bezeichnete Daten. Dies sind die aus einem Helikopter als auch die im NGSIM-Projekt [NGS09] mit einer hochpositionierten festinstallierten Kamera aufgenommenen Daten. Nach [MZ07] verwenden sie die Daten der Einzelfahrzeuge für die Betrachtung der „Speed Change" und die „remote sensing"-Daten für die Betrachtung der „Lane Change". Die verwendeten Messdaten sind zwar nicht im Detail beschrieben, es ist aber zu vermuten, dass die aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragenen Messdaten an unterschiedlichen Orten und zu unterschiedlichen Zeiten erhoben wurden. Sie erhalten aufgrund ihres Kalibrierungsansatzes deterministische Werte für die Parameter ihres Simulationsmodells, sodass alle Fahrer ein identisches Verhalten in der Simulation zeigen würden. Um unterschiedliches Fahrerverhalten abzubilden, überlagern sie in ihrem Modell die Wahrnehmung des Fahrers mit Rauschen. Um das Modell zu validieren, vergleichen sie empirische Fahrzeiten mit den simulierten Fahrzeiten, indem sie diese grafisch gegenüberstellen. Hierzu verwenden sie makroskopische Daten, die allerdings keinen Bezug zu den zuvor genannten mikroskopischen Messdaten haben.

Im Beitrag von [LVZC+09] wird die durchgeführte Kalibrierung des Simulationsmodells des Werkzeugs VISSIM vorgestellt, um die Optimierung einer Lichtsignalsteuerung zur Emissionsreduzierung zu untersuchen. Die Autoren ermitteln, dass die oft verwendete Vorgehensweise der Kalibrierung mit Verkehrsstärken oder Reisezeiten nicht geeignet ist, um das detaillierte Fahrverhalten von gefahrenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen abzubilden. Gerade aber die Letztgenannten beeinflussen die Emissionen im besonderen Maße. Aus diesem Grund kalibrieren die Autoren ihr Modell mit mikroskopischen Daten, die sie aus einer Videoaufzeichnung der zu optimierenden Kreuzung extrahieren. Nach Abschluss der Kalibrierung validieren sie ihr Modell auf makroskopischer Ebene, indem sie die aus empirischen und simulierten Daten erhaltenen Verteilungsfunktionen für Geschwindigkeit und Beschleunigung vergleichen. Durch die Kalibrierung konnten die Autoren eine deutliche Reduzierung der Abweichung zwischen den simulierten Emissionen mit den aus den empirischen Messdaten abgeschätzten Emissionen erreichen. Zur weiteren Verbesserung der Ergebnisse nennen sie die Notwendigkeit das Modell selbst anzupassen, da die Fahrzeuge vor bereits roten Lichtzeichen erst spät und dadurch zu stark verzögern sowie zu stark aus dem Stand beschleunigen. Eine Übertragbarkeit des Vorgehens zur Untersuchung von VAS ist nicht gegeben, da nur eine Kreuzung und kein mehrere Kilometer langer Autobahnabschnitt mit Ein- und Ausfahrten betrachtet wurde.

Bewertung des Ansatzes III

Zusammenfassend entspricht der Ansatz III in den Grundzügen den Anforderungen zur Untersuchung von VAS, wobei eine Validierung auf mikroskopischer Ebene nicht beschrieben ist. Die bisherigen Ansätze kommen zum Teil nicht über den Konzeptstatus hinaus, da die notwendigen Messdaten zur Durchführung des Konzepts nicht vorlagen. In den wenigen Arbeiten, in denen sowohl mikroskopische als auch makroskopische Messdaten verwendet wurden, werden die verwendeten Messdaten nicht den Anforderungen zur Untersuchung von VAS auf deutschen Autobahnen gerecht, da die Messdaten aus unterschiedlichsten

Quellen zusammengetragen wurden und damit keinen örtlichen und zeitlichen Bezug zueinander haben.

5.2.4 Zusammenfassung

Aus der obigen Darstellung ist folglich festzustellen, dass die bisherigen Ansätze nicht für die Untersuchung von VAS geeignet sind.

Bei dem Vorgehen nach Ansatz I findet keine Berücksichtigung makroskopischer Verkehrsgrößen und damit keine Validierung des Modells auf makroskopischer Ebene statt. Nach Abschnitt 3.3 darf aus der Validation eines Subsystems des Gesamtmodells nicht automatisch auf ein valides Modell auf höherer (makroskopischer) Modellebene geschlossen werden. Die makroskopischen Ergebnisse eines nur mikroskopisch kalibrierten Simulationsmodells wären besonders kritisch zu hinterfragen.

Andererseits darf in Ansatz II durch die Validation des Modells auf makroskopischer Ebene nicht auf die Validität der einzelnen Submodelle auf mikroskopische Ebene geschlossen werden. Es ist unter Umständen möglich, dass unterschiedliche Kombinationen mikroskopischer Verhaltensweisen zum gleichen makroskopischen Verhalten führen. Besonders kritisch ist die Validität der mikroskopischen Modelle auf mikroskopischer Ebene zu hinterfragen, bei denen die Zielsetzung bei der Entwicklung des Modells nicht die valide mikroskopische, sondern nur die valide makroskopische Abbildung war.

Ansatz III ist prinzipiell für die Untersuchung von VAS geeignet, wobei die bisherigen Durchführungen dieses Ansatzes an mehreren Stellen Unzulänglichkeiten zeigen. Schwachpunkt sind insbesondere die notwendigen Messdaten. Viele Anwender besitzen nicht die für ihre Untersuchung notwendigen Messdaten und müssen daher die Daten nutzen, die sie früher selbst in einem anderen Kontext erhoben haben oder ihnen von einer anderen Stelle zur Verfügung gestellt wurden. Dies hat zur Folge, dass Messdaten aus unterschiedlichsten Untersuchungen zusammengetragen werden. Alternativ werden Teile von Untersuchungen ausgelassen, da insbesondere Messdaten der mikroskopischen Ebene fehlen.

Bisherige Untersuchungen lassen offen, ob mit den bislang verwendeten Modellen eine Übereinstimmung auf zwei Ebenen zu erreichen ist oder ob diese Modelle in dieser Hinsicht wichtige Aspekte vernachlässigen. Um die Eignung oder Nicht-Eignung bisheriger Modelle zur Untersuchung von VAS zu belegen, ist es zwingend notwendig, die erforderlichen Messdaten zu erheben, die die oben genannten Ansätze bisher nicht angegangen sind. Hierzu wird im folgenden Kapitel ein ganzheitliches Kalibrierungs- und Validierungskonzept aufgezeigt, die notwendigen Mess- und Kenngrößen ermittelt und ein Messkonzept vorgestellt.

6 Kalibrierungs- und Validierungskonzept zur simulativen Untersuchung von VAS

Die Darstellung des Standes von Wissenschaft und Technik in Abschnitt 5.2 hat aufgezeigt, dass die bisherigen Vorgehensweisen zur Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen die Anforderungen zur Untersuchung eines VAS nicht oder unzureichend erfüllen. In diesem Kapitel wird ein Kalibrierungs- und Validierungskonzept aufgezeigt, das sowohl die mikroskopische als auch die makroskopische Ebene berücksichtigt. Zur Umsetzung dieses Konzepts ist die Erfassung einer Vielzahl von Verkehrskenngrößen notwendig, die in Abschnitt 6.2 ermittelt werden. Es wird in den Abschnitten 6.3 bis 6.7 ein geeignetes Messkonzept ausgearbeitet, um diese Kenngrößen in der Empirie und der Simulation zu erheben. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 6.8.

6.1 Ganzheitliche Kalibrierungs- und Validierungsmethode

In Abschnitt 4.2 wurde aufgezeigt, dass zur Untersuchung von VAS ein mikroskopisches Verkehrssimulationsmodell verwendet werden muss, das nach Abschnitt 3.3 das Fahrverhalten von Mensch und Assistenzsystem valide abbildet, um so auch die Unterschiede im Fahrverhalten der beiden wiedergeben zu können. Da mit der Kalibrierung mit makroskopischen Kenngrößen wie Verkehrsstärke und mittlerer Geschwindigkeit keine Aussage über die Abbildungsgenauigkeit des individuellen Fahrverhaltens von Fahrer und Fahrzeug gemacht werden kann, ist es notwendig, das mikroskopische Modell auf mikroskopischer Ebene zu kalibrieren. Um sicherzustellen, dass das kalibrierte Modell nicht nur die während der Kalibrierung verwendeten empirischen Daten valide wiedergibt, ist es erforderlich, das Modell auf mikroskopischer Ebene mit einem zweiten Datensatz zu validieren. Dieses entspricht dem beschriebenen Vorgehen in Unterabschnitt 5.2.1. Nach Abschnitt 3.3 ist auf mikroskopischer Ebene dabei sowohl das Fahrzeugfolge- als auch das Fahrstreifenwechselverhalten zu berücksichtigen.

Wie in Abschnitt 3.3 und Unterabschnitt 5.2.1 bereits aufgezeigt, kann anhand des mikroskopisch validierten Modells nicht auf die Validität auf makroskopischer Ebene geschlossen werden. Da das VAS den makroskopischen Verkehrsfluss optimieren soll, ist die Validierung auf mikroskopischer Ebene für die Untersuchung des VAS zwar notwendig, aber nicht hinreichend. Mit der Erkenntnis, dass die makroskopische Ebene gegebenenfalls nicht valide abgebildet wird, ist die Simulation nicht geeignet, die Verbesserung des Verkehrsflusses durch das VAS zu quantifizieren. Um eine quantitative Aussage zu erhalten, ist es notwendig, die das Simulationsmodell auch auf makroskopischer Ebene zu validieren. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Zwei-Ebenen Ansatz zur Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen vorgestellt, der die oben beschriebene Kalibrierung

und Validierung auf mikroskopischer Ebene erweitert.

Das Vorgehen des Zwei-Ebenen Ansatzes ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Basis dieses Vorgehens sind zwei empirische Datensätze (mit „A“ und „B“ benannt). Die beiden Datensätze A und B sollen dabei unter vergleichbaren Bedingungen aufgenommen werden. Möglich wäre z. B. die Messdatenerhebung während der Verkehrsspitzenzeit am späten Nachmittag an zwei unterschiedlichen Tagen für einen identischen Streckenabschnitt. Ein Datensatz kann dabei weiter unterteilt werden und zwar in mikroskopische Einzelfahrzeugdaten („A_1“ und „B_1“) als auch makroskopische („A_2“ und „B_2“), den Verkehrsablauf beschreibende Messdaten. Eine weitere Detaillierung dieser Messdaten in geeignete mikroskopische und makroskopische Kenngrößen wird im folgenden Abschnitt 6.2 vorgenommen. Die mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten müssen entsprechend im gleichen Zeitraum der Erhebung und auf dem betrachteten Streckenabschnitt, auf dem die makroskopischen Daten erhoben werden, aufgezeichnet werden, um den in Abbildung 3.6 dargestellten Zusammenhang von mikroskopischen und makroskopischen Verhalten zu erfassen.

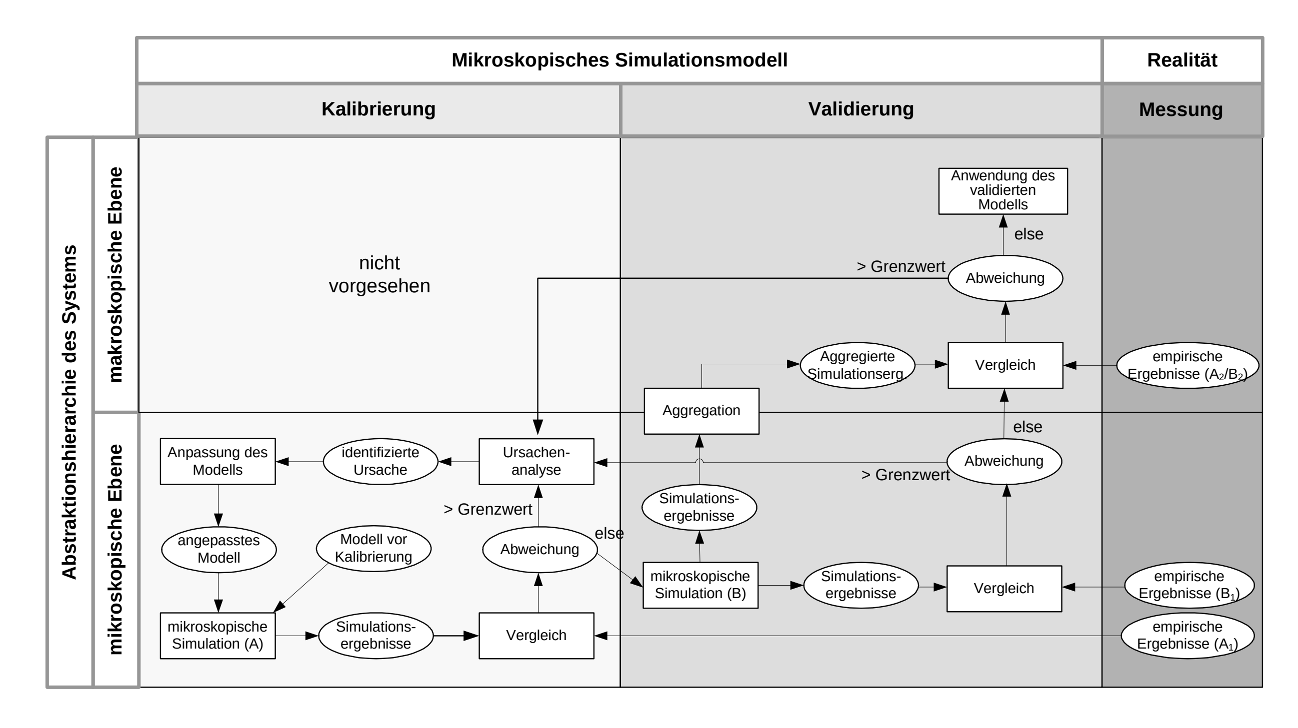


Abbildung 6.1: Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene

Für die vorgestellte Kalibrierung auf mikroskopischer Ebene werden die mikroskopischen Messdaten des Datensatzes A_1 und für die Validierung auf mikroskopischer Ebene die mikroskopischen Messdaten des Datensatzes B_1 verwendet. Im Vergleich zu Ansatz I (siehe Unterabschnitt 5.2.1), ist nach Abschluss der Validation auf mikroskopischer Ebene das Vorgehen zu erweitern. Nachdem auf mikroskopischer Ebene das Modell validiert wurde, werden auch die makroskopischen Kenngrößen aus der Simulation mit den empirischen makroskopischen Kenngrößen verglichen.

Für die Validation auf makroskopischer Ebene sollen sowohl die empirischen Messdaten des Datensatzes A_2 als auch des Datensatzes B_2 verwendet werden. Die Validation kann damit zwei Ergebnisse liefern. Mit der Validation mit Datensatz A_2, in dem mikroskopische und makroskopische Messdaten den gleichen Streckenabschnitt für den gleichen

Beobachtungszeitraum beschreiben, kann eine Aussage getroffen werden, wie gut das mikroskopisch kalibrierte Modell den makroskopischen Verkehrsfluss wiedergeben kann. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der richtigen Abbildung des Zusammenhangs aus dem Verhalten der einzelnen FFE zum resultierenden beobachtbaren Verkehrsfluss. Mit der Validation mit Datensatz B_2 kann wie bereits bei der Validation auf mikroskopischer Ebene festgestellt werden, ob das Modell nur für den für die Kalibrierung verwendeten Datensatz A_1 valide ist, oder ob das Modell auch auf andere Betrachtungszeiträume übertragbar ist.

Liegen bei diesen Vergleichen die Abweichungen zwischen den simulierten und empirischen makroskopischen Kenngrößen unterhalb eines zuvor festgelegten Grenzwertes, kann das validierte Modell zur Untersuchung des VAS angewendet werden. Liegen die Abweichungen oberhalb des Grenzwertes, ist eine Ursachenanalyse durchzuführen. Im einfachen Fall ist es möglich, durch Parameteranpassungen die Validität auf mikroskopischer Ebene beizubehalten und auch auf makroskopischer Ebene zu erreichen. Im aufwändigeren Fall sind die grundsätzlichen Modellannahmen zu analysieren und anzupassen.

Für die Durchführung des Zwei-Ebenen-Ansatzes wird empfohlen, zuerst nur mit einem Datensatz A zu beginnen. Für die Untersuchung des VAS ist es zwar notwendig, dass die identifizierten Parameter nicht nur für den betrachteten Einzelfall valide sind, aber eine erste Untersuchung mit nur einem Datensatz kann aufzeigen, wie gut ein mikroskopisch kalibriertes Modell die makroskopischen Kenngrößen valide für den gleichen Streckenabschnitt und Beobachtungszeitraum abbilden kann. In Abschnitt 5.2 wurde dargestellt, dass diese Art der Untersuchung bislang nicht mit geeigneten Messdaten durchgeführt wurde. In einem zweiten Schritt kann anschließend mit einem zweiten Datensatz B untersucht werden, wie gut ein mikroskopisch kalibriertes Modell sowohl die mikroskopischen Größen als auch makroskopischen Größen einer vergleichbaren Situation valide abbilden kann.

6.2 Notwendige Kenngrößen und Messkonzept

„Zur Überprüfung der Validität können prinzipiell alle verfügbaren Daten der Realität herangezogen werden“ [Tra06]. Um den Aufwand in einem vertretbaren Verhältnis zu halten, sind die Kenngrößen zur Kalibrierung und Validierung entsprechend dem Anwendungsfall auszuwählen. Es wird empfohlen, die Validierung mit mehreren Kenngrößen durchzuführen [Tra06]. Da in Abschnitt 6.1 noch nicht spezifiziert wurde, welche Kenngrößen für die Durchführung der Zwei-Ebenen-Kalibrierung und -Validierung notwendig sind, werden in diesem Abschnitt geeignete Kenngrößen ermittelt sowie ein Messkonzept zur Bestimmung dieser Kenngrößen beschrieben.

In Tabelle 6.1 sind die mindestens notwendigen Kenngrößen zur Durchführung der Simulationsuntersuchung sowie zur Kalibrierung und Validierung auf zwei Ebenen zusammengestellt. Um die Simulation durchführen zu können, ist die genaue Kenntnis der Strecke notwendig. Die hierfür notwendigen statischen Eingangsdaten für die Simulation sind im folgenden Abschnitt 6.3 zusammengestellt und sind daher nicht in Tabelle 6.1 enthalten.

Für die Durchführung der Simulation sind für das Merkmal Verkehrsaufkommen auf dem betrachteten Streckenabschnitt die folgenden dynamischen „Größen“ bereitzustellen. Es muss für den Beginn des betrachteten Streckenabschnitts und für alle Ein- und Ausfahrten die Anzahl der ein- bzw. ausfahrenden Fahrzeuge vorliegen. Ein Konzept zur Erfassung dieser Größen ist in Abschnitt 6.5 beschrieben.

In Abschnitt 3.3 wurde die Notwendigkeit aufgezeigt, sowohl das Fahrzeugfolge- als auch

Tabelle 6.1: Notwendige Kenngrößen zur Kalibrierung und Validierung auf zwei Ebenen (FSW=Fahrstreifenwechsel)

		Merkmale							
			Kalibrierung			**Validierung**			
				FSW			FSW		
Ebene	**Kenngröße**	Verkehrsaufkommen	Fahrzeugfolge	Strecke	Einfahrt	Fahrzeugfolge	Strecke	Einfahrt	Verkehrsfluss
mikroskopisch	Fahrzeuggeschwindigkeit		•	•	•	•	•	•	
	Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug		•			•			
	Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug		•			•			
	Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug auf Nachbarfahrstreifen			•	•		•	•	
	Relativgeschwindigkeit zum nachfolgenden Fahrzeug auf Nachbarfahrstreifen			•	•		•	•	
	Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auf Nachbarfahrstreifen			•	•		•	•	
	Abstand zum nachfolgenden Fahrzeug auf Nachbarfahrstreifen			•	•		•	•	
makroskopisch	Verkehrsstärke an allen beginnenden Abschnitten (inkl. Einfahrten)	•							•
	Verkehrsstärke an allen Ausfahrten	•							•
	Verkehrsstärke entlang der Strecke an ausgewählten Querschnitten						•		•
	mittlere lokale Geschwindigkeit entlang der Strecke an ausgewählten Querschnitten								•
	Reisezeiten/Fahrzeiten (Mittelwert, Verteilung)								•
	Fahrzeugabstände (Mittelwert, Verteilung)								•

das Fahrstreifenwechselverhalten zu kalibrieren und validieren. Abschnitt 6.4 vergleicht verschiedene Messverfahren zur Erfassung der in Tabelle 6.1 genannten Kenngrößen. Dort wird auch eine Auswahl für ein Messverfahren getroffen.

Für die Validierung auf makroskopischer Ebene soll die Verkehrsstärke entlang der Strecke (an ausgewählten Querschnitten) sowie die mittlere lokale Geschwindigkeit der Fahrzeuge betrachtet werden. Mit der Verkehrsstärke kann der Verkehrsfluss entlang der Strecke verglichen werden. Aus der Darstellung im Fundamentaldiagramm ist bekannt, dass ein Wert der Verkehrsstärke zwei unterschiedlichen Verkehrszuständen zugeordnet werden kann. Daher soll zusätzlich die mittlere lokale Geschwindigkeit betrachtet werden. Ein

Konzept zur Erfassung der notwendigen Kenngrößen und die Unterscheidung in verschiedene Fahrzeugklassen werden in Abschnitt 6.5 vorgestellt. Bei der fahrstreifengenauen Erfassung der Kenngrößen kann auch das Fahrstreifenwechselverhalten auf makroskopischer Ebene validiert werden, indem die Fahrstreifenaufteilung, d.h. die prozentuale Verteilung der Fahrzeuge (nach Fahrzeugklassen) auf den einzelnen Fahrstreifen ausgewertet wird, da sich diese Verteilung in Abhängigkeit des Fahrstreifenwechselverhaltens einstellen wird.

Die Reisezeit ist die bedeutendste Kenngröße, um die Verkehrsqualität aus Nutzersicht anzugeben [HWAK01], [MMM09]. Die Größe ist gerade deswegen interessant, da sie sowohl durch den Verkehrszustand als auch das individuelle Fahrverhalten beeinflusst wird. Da die Reisezeit allgemein die Fahrtdauer vom Ausgangs- zum Zielort inklusive aller Aufenthalte beschreibt [Höf06], soll im folgenden die Benennung „Fahrzeit“ verwendet werden, die die Fahrtdauer nicht auf der Gesamtstrecke, sondern nur auf dem betrachteten Streckenabschnitt beschreibt. Die Fahrzeit soll als ergänzende und für den Nutzer bedeutsame Größe für den Vergleich herangezogen werden. Ein Konzept zur Erfassung der Fahrzeiten auf der betrachteten Strecke ist in Abschnitt 6.5 beschrieben.

In der Einleitung dieser Arbeit wurde bereits beschrieben, dass die Autoren von [MMB01b] in ihrem Vergleich von Untersuchungen zu den Auswirkungen von ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss ermittelt haben, dass der in der Simulation bestimmte Einfluss auf die Verkehrsstärke und die mittlere Geschwindigkeit vom Unterschied der in der Simulation nachgebildeten „headway distribution“ des menschlichen Fahrers und der vom System angestrebten „target headway“ abhängig ist. Aus diesem Grund soll die Abstandsverteilung zwischen den Fahrzeugen im Rahmen der Validierung auf makroskopischer Ebene ebenfalls betrachtet werden. Abschnitt 6.5 beschreibt die Auswahl einer geeigneten Erfassungsmethode und legt damit fest, ob die Verteilung von Nettozeitlücken oder Nettoweglücken betrachtet wird.

6.3 Streckenverlauf und zugehörige Objekte

Um die Simulation durchführen zu können, ist eine genaue Kenntnis der betrachteten Strecke notwendig, die in der Simulation nachgebildet werden muss. Tabelle 6.2 gibt eine Übersicht über die stationären Daten, die im Netzeditor zu hinterlegen sind. Zu diesen Daten gehören die Abbildung des Streckenverlaufs inklusive der Lage der Ein- und Ausfahrten (inkl. derer von Park- und Rastplätzen), die Anzahl der Fahrstreifen, die vorhandenen Fahrbahnmarkierungen, die installierte Sensorik sowie vorhandene stationäre und dynamische Gebots- (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung) und Verbotsschilder (z. B. Lkw-Überholverbot).

Für Niedersachsen kann der Streckenverlauf als digitale Karte bei der Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) im Drawing Interchange Format (DXF) erworben und in die gängigen Simulationswerkzeuge importiert werden. Die Länge von Ein- und Ausfahrten, die in den DXF Daten nicht vorhanden ist, kann am besten aus Luftbildaufnahmen bestimmt werden. Die Fahrstreifenanzahl ist dem Anwender oft bereits bekannt oder kann z. B. aus dem freien Kartenmaterial OpenStreetMap [OSM10] bestimmt werden. Die Art und Lage von Fahrbahnmarkierungen können ebenfalls aus Luftbildaufnahmen entnommen werden. Vorhandene Gebots- und Verbotsschilder können aus Videoaufzeichnungen eines Versuchsfahrzeugs entnommen und in der Simulation abgebildet werden. Die Verkehrsrechnerzentrale bzw. die zuständigen Behörden (in Niedersachsen die Nds.

Tabelle 6.2: Mögliche Datenquellen zur Beschreibung des Straßennetzes und zugehöriger Objekte

Datenart	LGN (digitale Karte (DXF))	OpenStreetMap (OSM)	Luftbildaufnahmen	Video und GPS	Verkehrsrechnerzentrale
Streckenverlauf	•	•	•		
Anzahl Fahrstreifen		•	•	•	•
Fahrbahnmarkierungen			•		
Gebots- und Verbotsschilder (stat.)		•		•	
Position lokale Sensorik					•
Position Wechselverkehrszeichen					•
Gebots- und Verbotsschilder (dyn.)					•
Algorithmus zur Steuerung der WVZ					•

Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr) haben detaillierte Kenntnis über die auf der betrachteten Strecke vorhandene installierte Sensorik und Wechselverkehrszeichen. Die genaue Position dieser Einrichtungen ist in der Simulation detailliert zu hinterlegen sowie die erfassbaren Verkehrskenngrößen und Fahrzeugklassen festzulegen.

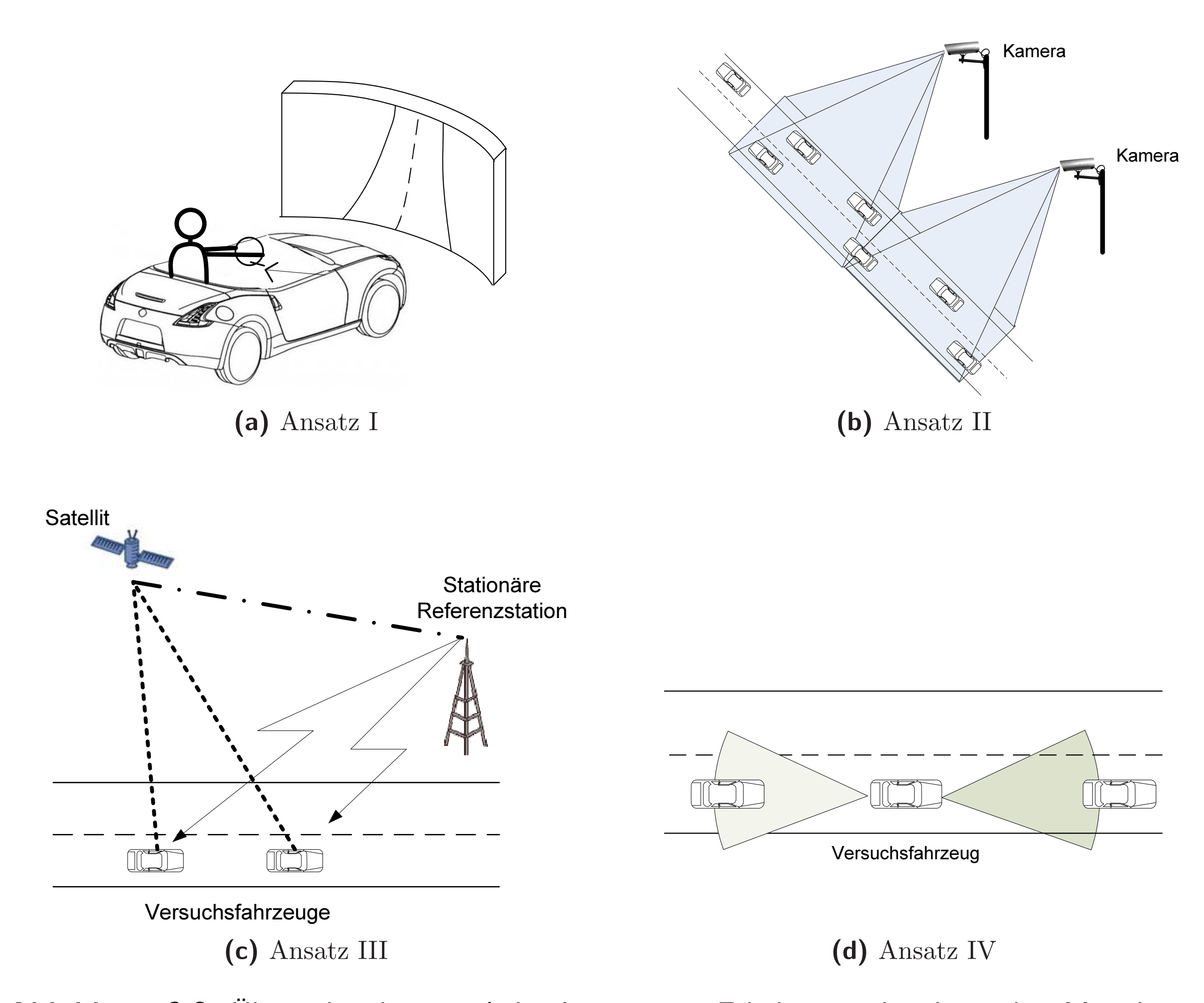
Die Betrachtung eines mit Wechselverkehrszeichen, also mit dynamischen Gebots- und Verbotsanzeigen, ausgestatteten Streckenabschnitts erhöht die Komplexität der Simulation. Der Verlauf der geschalteten Wechselverkehrszeichen wird in der Verkehrsrechnerzentrale archiviert. Diese Information kann dann für den vorliegenden Fall in der Simulation abgebildet werden. Werden dabei Datensätze ausgewählt, in denen die Steuerung der Wechselverkehrszeichen ausschließlich automatisch erfolgte, müssen keine manuellen Befehle vom Anwender berücksichtigt werden, sodass im Simulationswerkzeug direkt oder als Programmcode über die Schnittstelle des Werkzeugs auch der Steuerungsalgorithmus nachgebildet werden kann. Diese automatisch generierten Anzeigen der Wechselverkehrszeichen sollten bei der Simulation auf Plausibilität geprüft werden.

6.4 Konzept zur empirischen Erhebung mikroskopischer Daten

Das Verhalten der Fahrzeuge wird entscheidend durch die Parameter der verwendeten Modelle der Fahrzeugfolge und des Fahrstreifenwechsels beeinflusst. Diese Parameter können in der Simulation für unterschiedliche Fahrzeugklassen eingestellt werden, wobei im vorgestellten Konzept nur die zwei Fahrzeugklassen „Pkw-Ähnliche“ und „Lkw-Ähnliche“

betrachtet werden. Eine Betrachtung weiterer Fahrzeugklassen würde den Aufwand durch die notwendige Einstellung der Modellparameter für jede weitere Fahrzeugklasse deutlich erhöhen. Das VAS ist für „Pkw-ähnliche“ Fahrzeuge konzipiert, sodass, um die Unterschiede zwischen menschlichem Fahrverhalten und Systemverhalten abzubilden, insbesondere das menschliche Folgeverhalten als auch das Fahrstreifenwechselverhalten für Pkws in der Simulation valide abgebildet werden muss. Das Konzept muss es aber ebenfalls erlauben, die Kenngrößen zur Bestimmung der Modellparameter für „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge zu erfassen, um deren Auswirkung auf den Verkehrsfluss zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung der Parameter der Modelle von Fahrzeugfolge und Fahrstreifenwechsel ist die Verwendung von empirischen mikroskopischen Daten und damit die Betrachtung von Einzelfahrzeugen notwendig. Zur Erhebung dieser Daten können vier Ansätze unterschieden werden, die im Folgenden beschrieben sind. Abbildung 6.2 zeigt eine grafische Darstellung dieser vier Ansätze.



(a) Ansatz I

(b) Ansatz II

(c) Ansatz III

(d) Ansatz IV

Abbildung 6.2: Übersicht über mögliche Ansätze zur Erhebung mikroskopischer Messdaten

- Im Ansatz I kommt ein Fahrsimulator zum Einsatz, indem ein Proband ein simuliertes Fahrzeug fährt. Die Messdaten des simulierten Fahrzeugs und der umgebenden Fahrzeuge können im Fahrsimulator bestimmt werden.

- Im Ansatz II werden mikroskopische Daten von Einzelfahrzeugen aus Luftbildaufnahmen eines Streckenabschnitts mithilfe von Algorithmen der Bildverarbeitung extrahiert.
- Im Ansatz III werden mindestens zwei Fahrzeuge mit hochgenauen Ortungseinrichtungen, z. B. einem Differential-GPS (DGPS) ausgestattet, die anschließend auf einer Strecke hintereinanderfahren und deren Positionsdaten aufgezeichnet werden. Aus den erhaltenen Positionsdaten können die Fahrzeuggeschwindigkeiten und Fahrzeugabstände ermittelt werden.
- Im Ansatz IV wird ein Versuchsfahrzeug mit Sensorik, die meist auf Radar- oder Lidartechnologie basiert, zur Bestimmung des Abstandes und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden bzw. nachfolgendem Fahrzeug ausgestattet. Diese Daten werden zusammen mit der Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs aufgezeichnet.

Diese Ansätze werden nun kompakt mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt (vgl. [Oss08], [HW04]).

Im *Ansatz I* fahren Probanden mit einem Fahrsimulator ein virtuelles Fahrzeug in einer virtuellen Umgebung. Die Steuerung findet im einfachsten Fall nur mit einem Lenkrad sowie Pedalen für Bremse und Gas statt. Im aufwändigeren Fall wird ein reales Fahrzeug, das mit großen Videoleinwänden umgeben ist, um die Umgebung zu simulieren, entsprechend umgebaut [SBKK05]. Im Idealfall wird dabei sogar die Fahrzeugdynamik auf das Fahrzeug übertragen. Vorteile einer Fahrsimulatorstudie sind die reproduzierbaren, vom Anwender einstellbaren Fahrsituationen. Der große Nachteil an diesem Verfahren ist, dass der Fahrer sich bewusst ist, dass er beobachtet wird und es dadurch zu einem veränderten Verhalten kommen kann. Diese Veränderung des Verhaltens einer Person unter Versuchsbedingungen ist auch als Hawthorne-Effekt bekannt. Das Verhalten der Fahrer ist außerdem abhängig von der Qualität der simulierten Umgebung inklusive dem eigenem Fahrzeug. Darüber hinausgehend haben Unfälle im Fahrsimulator im Gegensatz zum realen Verkehrsgeschehen keine negativen Auswirkungen auf den Fahrer, sodass der Fahrer im Fahrsimulator ggf. weniger vorsichtig unterwegs ist und weniger vorausschauend fährt.

Im *Ansatz II* erfolgt die Verkehrsbeobachtung durch Luftbildaufnahmen. Dieser Ansatz kann in zwei Varianten unterschieden werden. In der ersten Variante findet die Beobachtung an einem festen Ort, z. B. durch installierte Kameras auf einem hohen Gebäude, statt. In der zweiten Variante wird die Kamera unter einem Hubschrauber montiert und der interessierende Streckenabschnitt überflogen.

Zwei Untersuchungen nach der *ersten Variante* sind besonders bekannt. Dies sind die Untersuchungen der US Federal Highway Administration aus den Jahren 1982-1985, in denen sechs Abschnitte von Freeways beobachtet wurden [HW04]. Diese Messdaten wurden noch 20 Jahre nach der Datenerhebung in einer Vielzahl von Forschungsarbeiten verwendet ([HW04], vgl. auch Dissertation von Toledo in Unterabschnitt 5.2.3). Im Rahmen des Next Generation SIMulation (NGSIM)-Programm wurden vier Streckenabschnitte in den Jahren 2005 und 2006, die in Tabelle 6.3 aufgeführt sind, mit Videokameras beobachtet. Verfügbar sind je Streckenabschnitt jeweils zwei oder drei Datensätze von 15 Minuten Dauer.

Tabelle 6.3: Eigenschaften der Datensätze im NGSIM-Programm, nach [PBC10]

Datensatzname	I-80	US-101	Lankershim	Peachtree
Datensatzanzahl	3	3	2	2
Jahr der Erhebung	2005	2005	2005	2006
Straßenart	Freeway	Freeway	Arterial	Arterial
Länge (m)	503	640	488	640
Anzahl an Kreuzungen	0	0	4	5
Anzahl an Kameras	7	8	5	8

Vorteile dieses Vorgehens sind, dass die beobachteten Fahrer nahezu von der Beobachtung unbeeinflusst sind und ein im Vergleich zur zweiten Variante größerer Streckenabschnitt beobachtet werden kann. Damit ist es möglich nicht nur das Fahrzeugfolge-, sondern auch das Fahrstreifenwechselverhalten zu untersuchen. Nachteile sind die Festlegung auf einem bestimmten und außerdem kurzen Streckenabschnitt von wenigen Hundert Metern. Die in Tabelle 6.3 aufgeführten Strecken haben eine maximale Länge von 640 m, sodass z. B. das Fahrzeugfolgeverhalten nur örtlich und zeitlich begrenzt beobachtet werden kann. Etwaige lokale Einflüsse (Straßengeometrie, Fahrbahnbeschaffenheit, u.a.) gehen bei dieser Art der Beobachtung stark in das beobachte Verhalten ein.

Der Nachteil der Festlegung auf einen bestimmten Ort wurde am DLR Berlin durch den Aufbau von zwei speziellen Messfahrzeugen umgangen. Die örtlich flexibel einsetzbaren Fahrzeuge waren mit 13 Meter hohen Teleskopmasten ausgestattet sind, um eine hohe Positionierung von Kameras zur Beobachtung von Straßenkreuzungen zu ermöglichen [DLR09].

Besonderer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass mit Algorithmen der Bildverarbeitung aus den aufgenommenen Bildern die Position der Fahrzeuge bestimmt wird und anschließend aus der Ableitung der Position die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Fahrzeuge berechnet werden muss. In [PBC09] und [PBC10] werden die Daten der NGSIM-Datensätze untersucht. Die NGSIM-Datensätze enthalten bereits ermittelte Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie -beschleunigungen. Die Autoren ermitteln, dass die Integration der Fahrzeuggeschwindigkeiten eine längere Strecke ergibt als die in den Messdaten ausgewiesene, aus den Aufnahmen ermittelte gefahrene Strecke. Ursachen sind die ungenaue Positionsbestimmung der Fahrzeuge in den Aufnahmen und eine Verstärkung der Fehler bei der Ableitung der Position, um Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erhalten. Abbildung 6.3 zeigt ein Beispiel für ein Geschwindigkeitsprofil für ein Fahrzeug aus den NGSIM-Datensätzen sowie das von den Autoren von [PBC09] nachbearbeitete Geschwindigkeitsprofil. Werden die unkorrigierten Messdaten zur Kalibrierung verwendet, wird sich dieses im Ergebnis der Kalibrierung negativ auswirken [OH08].

Erste Untersuchungen nach der *zweiten Variante* führte Treiterer bereits 1969 [Tre69] durch. Obwohl diese Daten bereits 40 Jahre alt sind, gehören die von ihm aus den Messdaten generierten Fahrzeugtrajektorien zu den am häufigsten in der Literatur dargestellten. Neueste Untersuchungen mithilfe von unter einem Hubschrauber montierten Videokameras stammen von Hoogendoorn aus den Niederlanden [HZS+03], [HOS06]. Die Vorteile aus der ersten Variante bleiben bei diesem Vorgehen weitestgehend erhalten, wobei der beobachtbare Streckenabschnitt allerdings kleiner wird. Dafür besteht nun die Möglichkeit, einen beliebigen Streckenabschnitt zu beobachten. Damit geht der Nachteil

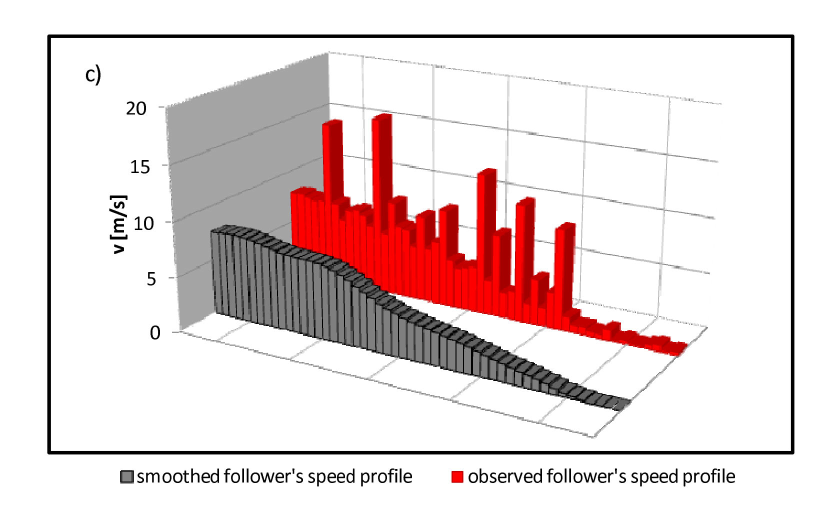


Abbildung 6.3: Beobachtetes und nachbearbeitetes Geschwindigkeitsprofil eines Folgefahrzeugs aus dem NGSIM-Datensätzen, aus [PBC09] (entlang der nicht beschrifteten Abszisse ist die Zeit t aufgetragen.)

einher, dass die Beobachtung deutlich aufwendiger und teurer im Vergleich zum fest installierten Kameraeinsatz ist und auch nur zeitlich begrenzt durchgeführt werden kann. Der Nachteil der aufwendigen Auswertung wird sogar noch verstärkt, da die Bewegung des Hubschraubers bei der Ermittlung der Bewegungen der Fahrzeuge berücksichtigt werden muss.

Die Ansätze III und IV werden insbesondere zur Bestimmung des Folgeverhaltens verwendet. Im *Ansatz III* werden mindestens zwei Versuchsfahrzeuge mit einem DGPS ausgestattet, deren Positionen während der Fahrt aufgezeichnet werden. Aus den Positionsdaten werden anschließend die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge abgeleitet. Dieser Ansatz ist stärker experimentell statt empirisch einzuordnen, da sowohl das vorausfahrende als auch das nachfolgende Fahrzeug von einem Versuchsfahrer gefahren wird. Dieser Umstand ist auch als größter Nachteil dieses Verfahrens zu nennen.

Zur Untersuchung des Folgeverhaltens sind wiederum zwei Varianten zu unterscheiden. In der *ersten Variante* wird die Untersuchung auf einem speziellen Testgelände durchgeführt. In [BKW04a] wurden neun Fahrzeuge mit einem DGPS ausgestattet. Die Fahrten fanden auf einem 3 km langen Rundkurs in Hokkaido in Japan im Oktober 2001 statt, in denen das Führungsfahrzeug vorgegebene Geschwindigkeitsprofile fahren musste. Aus den aufgezeichneten Positionsdaten der neun Fahrzeuge wurden die Geschwindigkeiten der Einzelfahrzeuge und die Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ermittelt. In [GNA+02], [RNA04] und [RNK05] wurden zehn Fahrzeuge mit einem real time kinematic GPS (RTK GPS) ausgestattet. Die Versuchsfahrten wurden ebenfalls auf dem oben genannten Rundkurs in Hokkaido und unter Vorgabe bestimmter Geschwindigkeitsprofile an den Fahrer des Führungsfahrzeugs durchgeführt. Nachteil dieser ersten Variante ist die Durchführung auf einem Testgelände ohne Nachweis der Übertragbarkeit des beobachteten Verhaltens auf den öffentlichen Straßenverkehr.

Bei der *zweiten Variante* wurden die Versuchsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt. In [HW04] wurden zwei Fahrzeuge mit DGPS ausgestattet und Fahrten in

Sydney (Australien) auf einem städtischen Rundkurs absolviert. [PS05] führten Versuche in der Umgebung von Neapel (Italien) mit vier mit DGPS ausgestatteten Fahrzeugen durch. Dabei wurden sowohl Fahrten auf innerstädtischen als auch außerstädtischen Straßen, die allerdings alle einstreifig waren, durchgeführt. Bei den Versuchen der Variante zwei kommt beim Einsatz auf Autobahnen oder allgemein bei mehrstreifigen Straßen erschwerend hinzu, dass die ausgestatteten Fahrzeuge sich direkt folgen müssen und sich keine anderen Verkehrsteilnehmer zwischen sie einordnen dürfen. Diese Anforderung beeinflusst ggf. das Fahrerverhalten, indem bewusst kurze Abstände eingehalten werden, um das Einscheren anderer Fahrzeuge zu verhindern, was als Nachteil dieser Variante anzusehen ist.

Als Vorteil des Verfahrens ist die Flexibilität hinsichtlich örtlicher und zeitlicher Durchführung der Versuchsfahrten zu nennen. Nachteilig ist, dass die Verwendung dieses Ansatzes zur Bestimmung des Fahrstreifenwechselverhaltens nicht bekannt ist und als nicht geeignet eingestuft werden muss. Bei ausreichender Anzahl ausgestatteter Fahrzeuge könnte theoretisch das Fahrstreifenwechselverhalten bestimmt werden, wenn damit insbesondere Abstand und Geschwindigkeit des vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugs auf dem Nachbarfahrstreifen bekannt sind. Die voraussichtliche starke Beeinflussung der Versuchsfahrer untereinander würde die Aussagekraft der Ergebnisse stark einschränken.

Im *Ansatz IV* wird ein Versuchsfahrzeug mit Sensorik zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden bzw. nachfolgendem Fahrzeug ausgestattet. Die Eigengeschwindigkeit liefern die fahrzeugeigenen Sensoren. In den letzten 10-15 Jahren wurde eine Vielzahl an Fahrzeugen auf diese Weise ausgestattet. In [BSM02] wird der Aufbau eines Fahrzeugs beschrieben, mit dem durch Umbau der Sensorik entweder das vorausfahrende oder das nachfolgende Fahrzeug beobachtet werden kann. Die gleichzeitige Beobachtung des vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugs erfolgte bereits in der Dissertation von Witte [Wit96]. Die verwendeten Sensoren waren zu diesem Zeitpunkt allerdings noch Prototypen, sodass einige Einschränkungen bei der Messwerterfassung hinzunehmen waren. Neuere Arbeiten nach diesem Ansatz sind in [HW04], [Tat05] und [Har07] beschrieben.

Vorteile dieses Verfahrens sind die große Flexibilität und die Möglichkeit längere Streckenabschnitte zu untersuchen. Die Aktionen des Fahrers und das Fahrzeugverhalten können direkt beobachtet werden und müssen nicht aus anderen Messwerten abgeleitet werden. Bei der Beobachtung der nachfolgenden Fahrzeuge kann aufgrund der großen Anzahl an beobachteten Fahrern die Inter-driver-Variabilität bestimmt werden. Da der Fahrer des nachfolgenden Fahrzeugs nicht in Kenntnis der Untersuchung ist, kann eine Veränderung des Fahrerverhaltens ausgeschlossen werden. Bei einer ggf. vorhandenen Abhängigkeit des Verhaltens des nachfolgenden Fahrzeugführers vom Fahrverhalten des vorausfahrenden Fahrers, ist es bei Durchführung der Fahrten mit nur einem Versuchsfahrer allerdings möglich, das Verhalten der nachfolgenden Fahrzeugführer nicht in vollem Umfang zu erfassen. Beispielsweise kann ein bewusst langsames Fahren des Versuchsfahrers auf den Überholfahrstreifen die nachfolgenden Fahrzeuge zum dichten Auffahren bewegen und damit die Ergebnisse beeinflussen. Der Hawthorne-Effekt aber muss lediglich bei der Betrachtung des Folgeverhaltens des Fahrzeugführers des Versuchsfahrzeugs bedacht werden. Bei dieser Betrachtung kann ergänzend die Intra-driver-Variabilität des Fahrzeugführers bestimmt werden. Der Ansatz hat den Nachteil, dass bei Einsatz nur eines Versuchsfahrzeugs nur eine sehr lokale Sichtweise möglich ist und wenig über die weitere Fahrzeugumgebung bekannt ist. In bisherigen Arbeiten wurde mit diesem Ansatz

wie bei Ansatz III lediglich das Fahrzeugfolgeverhalten untersucht.

Aufgrund des starken Einflusses des Verhaltens des Versuchsfahrers auf das Ergebnis in Ansatz I und III sowie des begrenzten Beobachtungsabschnitts in Ansatz II wurde im Rahmen der Arbeit ein Versuchsfahrzeug nach Ansatz IV ausgerüstet, das die Erfassung der Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs, sowie Relativgeschwindigkeit und Abstand des vorausfahrenden und des nachfolgenden Fahrzeugs ermöglicht. Das Versuchsfahrzeug kann ortsungebunden eingesetzt werden, wodurch eine Untersuchung in beliebiger Umgebung möglich ist. Der Aufbau und die Messgrößen des Versuchsfahrzeugs sind im Detail in Abschnitt 7.1 beschrieben. Die genannten Nachteile des Ansatzes IV sollen durch ein im Folgenden beschriebenes Messkonzept verringert oder aufgehoben werden.

Der Nachteil der nur lokalen Sichtweise kann durch die vorgenommene gleichzeitige Betrachtung sowohl mikroskopischer als auch makroskopischer Größen aufgehoben werden. Die Verkehrsstärke und die mittlere lokale Geschwindigkeit sollen im Rahmen des Messkonzepts lokal für den betrachteten Streckenabschnitt und für den gleichen Betrachtungszeitraum ermittelt werden (siehe Abschnitt 6.5). Die Position des Versuchsfahrzeugs wird fortlaufend während der Versuchsfahrt mit einem GPS-Empfänger ermittelt und aufgezeichnet, sodass durch Ergänzung der makroskopischen Größen von Verkehrsstärke und mittlerer lokaler Geschwindigkeit aus lokalen Messungen nicht nur die direkte Fahrzeugumgebung bekannt ist, sondern auch der weiter entfernte Verkehrszustand.

Um nicht nur die Sichtweise eines einzelnen Versuchsfahrzeugs zu berücksichtigten, sollen im Messkonzept mehrere gleichartig ausgestattete Fahrzeuge gleichzeitig in einem definierten Erfassungsbereich am Verkehr teilnehmen. Mit einer geeigneten Orts- und Zeitreferenz unter Einschluss und Erfassung der nachfolgenden Fahrzeuge im Straßenverkehr ist es damit möglich, einen größeren Streckenabschnitt und eine größere Anzahl an Versuchsfahrern, an unterschiedlichen Versuchsfahrzeugen sowie beobachteten nachfolgenden Fahrzeugführern und Fahrzeugen zu betrachten. Mit dem Einsatz mehrerer Versuchsfahrzeuge und Versuchsfahrer kann auch ein ggf. vorhandener Einfluss des Fahrverhaltens des Versuchsfahrers auf die nachfolgenden Fahrzeuge ermittelt werden. Durch die Möglichkeit, die nachfolgenden Fahrzeuge zu beobachten, kann auch die zu Beginn des Abschnitts genannte Forderung zur Erfassung von Kenngrößen zur Beschreibung des Lkw-Fahrverhaltens erfüllt werden.

Die installierte Sensorik nach Ansatz IV ermöglicht keine Beobachtung der Fahrzeuge auf den Nachbarfahrstreifen. Es werden zwar weitere Objekte der Fahrzeugumgebung erkannt, aufgrund der Sensoreigenschaften (Öffnungswinkel) aber keine Fahrzeuge auf den Nachbarfahrstreifen in direkter Fahrzeugnähe. Es sind aber Verfahren denkbar, wie trotz dieser Einschränkung Kenngrößen zur Beschreibung von Fahrstreifenwechsel beobachtet werden können. Das Prinzip eines möglichen Verfahrens zeigt Abbildung 6.4 und basiert darauf, nicht die Abstände Δs_{h1} und Δs_{v1} zum nachfolgenden und vorausfahrenden Fahrzeug auf dem Nachbarfahrstreifen vor dem Fahrstreifenwechsel zu beobachten, sondern die Abstände Δs_{h2} und Δs_{v2} erst nach dem Fahrstreifenwechsel zu vermessen. Dieses Vorgehen kann auch zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeiten verwendet werden. Bei Bedarf kann der Spezialfall des Fahrstreifenwechselverhaltens an Einfahrten der Autobahn gesondert untersucht werden.

Nachteil des Verfahrens ist, dass erst recht spät die Lücke vermessen wird. In der Zeitspanne während des Fahrstreifenwechsels haben die Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen ggf. bereits auf den Fahrstreifenwechsel reagiert.

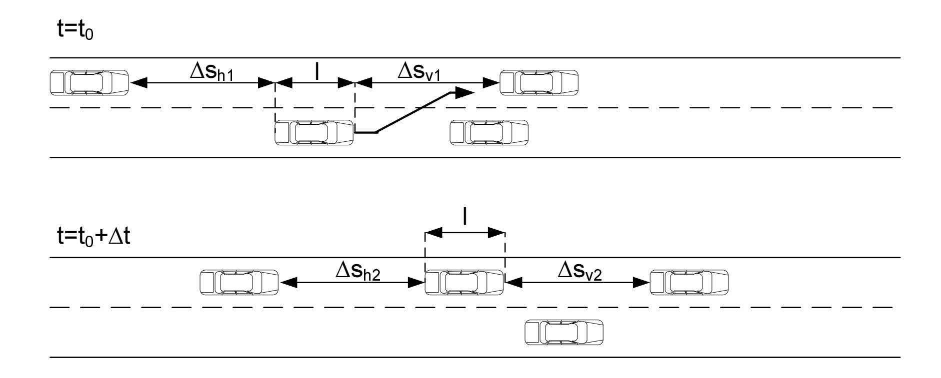


Abbildung 6.4: Darstellung der Messgrößen zur Ermittlung der akzeptierten Lücken beim Fahrstreifenwechsel

Die Bestimmung des für den Fahrer durch den Fahrstreifenwechsel erworbenen Nutzen, z. B. die Möglichkeit eine größere Fahrzeuggeschwindigkeit zu erreichen, ist bei Auswertung von Luftbildaufnahmen aufgrund des kurzen Streckenabschnitts nur eingeschränkt möglich. Mit dem vorgestellten Verfahren kann dieser Nutzen voraussichtlich besser ermittelt werden. Diese Ausarbeitung und Untersuchung bietet Potential für zukünftige Forschungsarbeiten.

6.5 Konzept zur empirischen Erhebung makroskopischer Daten

Tabelle 6.1 nennt als zu erfassende makroskopische Kenngrößen die Verkehrsstärke an allen beginnenden Streckenabschnitten, an allen Ausfahrten sowie an ausgewählten Querschnitten entlang der Strecke. Weiterhin sollen die mittlere lokale Geschwindigkeit an ausgewählten Querschnitten sowie die Mittelwerte und Verteilungen der Fahrzeiten und Fahrzeugabstände betrachtet werden.

Aktuelle Sensorsysteme zur Erfassung von *Verkehrsstärke* und *mittlerer lokaler Geschwindigkeit* können zwischen zwei und acht Fahrzeugklassen unterscheiden. Anhang B enthält eine Übersicht der Klassifizierung nach [Bun02].

Die bereits auf der Autobahn A2 in Niedersachsen installierte Sensorik ermittelt minütlich aggregiert an festen Orten, den sogenannten Messquerschnitten (MQ), die Verkehrsstärke und die mittlere lokale Geschwindigkeit getrennt nach Pkw-ähnlichen und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen jeweils separat für jeden Fahrstreifen. Diese Daten werden automatisch archiviert und können nachträglich in der Autobahnmeisterei Langenhagen aus einer Datenbank extrahiert werden. Um die bereits vorhandene Sensorik weiter benutzen zu können, soll daher in der Simulation nach nur diesen zwei Fahrzeugklassen unterschieden werden. Eine feinere Klassenaufteilung würde einen erheblichen Mehraufwand bei der mikroskopischen Kalibrierung und Validierung nach sich ziehen, da für jede Klasse ein unterschiedliches Fahrer-Fahrzeug-Verhalten in der Simulation hinterlegt werden kann. Die Messdaten dieser Messquerschnitte können sowohl dafür verwendet werden, das Verkehrsaufkommen in der Simulation abzubilden als auch zur Validierung

auf makroskopischer Ebene.

Ein- und Ausfahrten von Autobahnen sind bisher in der Regel nicht mit Sensorik zur Erfassung der Verkehrsstärke ausgestattet. Zur Erfassung der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge müssen die Ein- und Ausfahrten daher temporär während der Messfahrten mit entsprechender Sensorik ausgestattet werden. Hierzu wird im Folgenden eine Auswahl eines geeigneten Sensorsystems vorgenommen.

Ein Sensorsystem besteht grundsätzlich aus der eigentlichen Erfassungseinheit (Sensor oder Detektor), einer Verarbeitungseinheit und Speichereinheit und einer optionalen Übertragungseinheit. Die Erfassungseinheiten lassen sich nach der physikalischen Wirkung klassifizieren (Abbildung 6.5). Eine ausführliche Darstellung des Aufbaus, der Funktionsweise, der Installation, der erfassbaren Messgrößen sowie der Messungenauigkeit ist in [Sch10b] gegeben. Eine kompakte Übersicht zur verwendeten physikalischen Wirkung, zum Installationsort und zu den erfassbaren Kenngrößen gibt Tabelle 6.4.

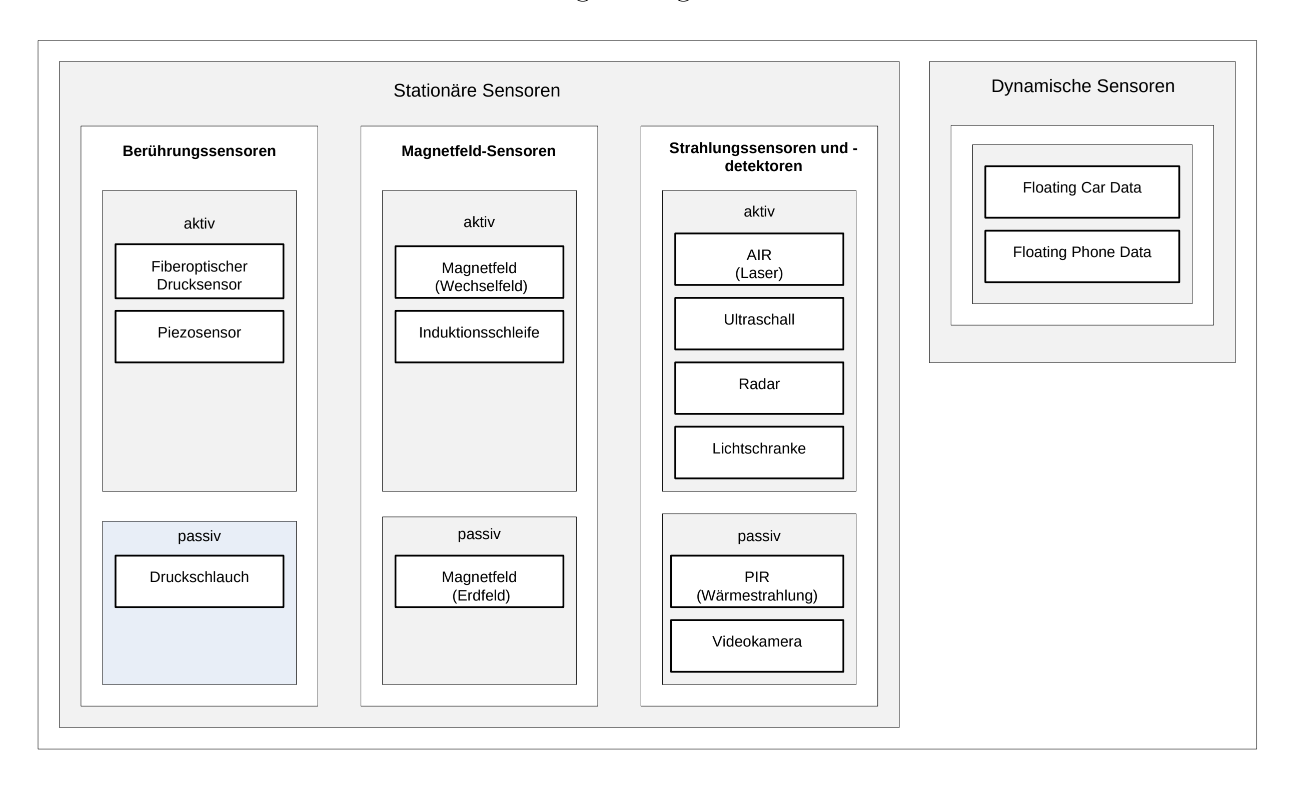


Abbildung 6.5: Klassifikation der Sensoren nach physikalischer Wirkung, nach [Sch10b]

Tabelle 6.4: Physikalische Wirkung, Installationsort und erfassbare Kenngrößen von Sensorsystemen zur Verkehrserfassung im Vergleich, nach [Sch10b]

Sensorsystem			**physik. Wirkung**			**Installationsort**				**Kenngrößen**								
	Aktiv	Passiv	Magnetfeld	Strahlung	Berührung	über der Fahrbahn	neben der Fahrbahn	auf der Fahrbahn	in der Fahrbahn	Verkehrsstärke q	Verkehrsdichte k	lokale Geschwindigkeit v_l	Mom. Geschwindigkeit v_m	Fahrzeugklassen (siehe Tabelle B.1)	Zeitlücke τ	Weglücke ξ	Belegung B	Anwesenheit
Induktionsschleifensensor																		
Einzeln	√		√					√	√	○	-	○	-	2	●	-	●	●
Doppelt	√		√					√	√	●	-	●	-	8+1	●	-	●	●
Radarsensor	√			√		√	√			●	-	●	-	2	●	-	●	○
Aktiver Infrarotsensor	√			√		√	√			●	-	●	-	5+1	●	-	●	●
Passiver Infrarotdetektor		√		√		√	√			●	-	●	-	2	●	-	●	○
Ultraschallsensor	√			√		√	√			●	-	○	-	2	●	-	●	●
Magnetfeldsensor	√	√	√			√	√	√	√	●	-	●	-	2	●	-	●	●
Drucksensoren																		
Einzeln	√	√			√			√	√	-	-	-	-	Achsen	-	-	-	○
Doppelt	√	√			√			√	√	●	-	●	-	5+1	●	-	●	○
Lichtschrankendetektor																		
Einzeln	√			√			√			○	-	-	-	-	●	-	●	●
Doppelt	√			√			√			●	-	●	-	2	●	-	●	●
Videodetektor		√		√		√	√			-	●	-	●	2	-	●	●	●
Sensorkombinationen	√	√		√		√	√			●		●	-	5+1	●	-	●	●
● = erfassbar , ○ = eingeschränkt erfassbar , - = nicht erfassbar																		

Für den Anwendungsfall ist eine Erfassung der Fahrzeuganzahl mit gleichzeitiger Fahrzeugklassifizierung (Pkw-ähnlich und Lkw-ähnlich) auf den Verbindungsrampen erforderlich. Die Messung der Fahrzeuggeschwindigkeiten ist nicht notwendig, da diese sehr stark von den örtlichen Gegebenheiten (Kurvenradius, Querneigung) abhängig ist und bei der Kalibrierung und Validierung nicht berücksichtigt werden soll.

Mögliche Sensorsysteme sollten mit einer eigenen Stromversorgung und eigenem Datenspeicher ausgestattet sein, um den Aufstellort möglichst frei wählen zu können. Ein Vergleich der erhältlichen Sensorsysteme in [Sch10b] hat für die Installation seitlich der Fahrbahn sowohl den Radarsensor als auch den passiven Infrarotsensor als geeignet eingestuft. Für die Installation auf der Fahrbahn wäre der Magnetfeldsensor, der pneumatische Detektor als auch der Piezo-Sensor geeignet. Die Analyse hat weiterhin ergeben, dass die Verkehrssicherheit bei den auf der Fahrbahn zu installierenden Sensoren beeinträchtigt werden kann. Ursache dafür ist, dass Motorradfahrer durch die entstehende Unebenheit insbesondere bei der Installation in einem Kurvenbereich und einer Durchfahrt mit hoher Geschwindigkeit gefährdet sind. Obwohl Systeme basierend auf Magnetfeldsensoren bei Preisen teilweise unter 1000 Euro deutlich günstiger als Radar- oder passive Infrarotsysteme mit Preisen von 2400 bis 3600 Euro sind, sollten aus Gründen der Verkehrssicherheit letztgenannte Systeme bevorzugt werden.

Abbildung 6.6 zeigt eine Skizze eines planfreien Autobahnknotenpunktes mit einer Empfehlung für die Messstandorte an Ein- und Ausfahrt. Um Fremddetektionen auszuschließen, sollte der Messstandort nicht zu nah an der Autobahn und den untergeordneten Straßen liegen. Wird der Messstandort vor der Zusammenführung von Einfahrt und Ausfahrt gewählt (Position 1 in Abbildung 6.6), können Strahlungssensoren seitlich an der Fahrbahn angebracht werden und gleichzeitig Fremddetektionen ausgeschlossen werden [Sch10b]. Die ermittelten Sensoren sind grundsätzlich in der Lage, auch die Fahrzeuganzahl auf zwei Fahrstreifen zu bestimmen. Durch Aufbau der Sensorik an Position 2 können die Fahrzeuge auf Ein- und Ausfahrt mit einem Sensor erfasst werden. Dieses ist aber nur bei geringer Verkehrsstärke an der Ein- und Ausfahrt möglich, da Fahrzeuge auf dem von der Sensorik aus gesehen weiter entfernten Fahrstreifen nur erkannt werden können, wenn sie nicht durch Fahrzeuge auf dem nähergelegenen Fahrstreifen verdeckt werden.

Die *Fahrzeiten* der auf dem Streckenabschnitt fahrenden Fahrzeuge werden mit der vorhandenen installierten Sensorik auf der Autobahn A2 zurzeit nicht bestimmt. Die Autoren von [LDW06] beschreiben ein Verfahren, mit dem eine relativ gute Wiedererkennung einzelner Fahrzeuge zwischen aufeinanderfolgenden Messquerschnitten möglich ist. Hierzu nutzen sie anstatt der aggregierten Messdaten der Induktionsschleifen die Rohdaten der Sensoren. Nachteilig hieran ist, dass hierzu ein direkter Zugriff auf die installierten Induktionsschleifen notwendig ist, um die Rohdaten zu erhalten. Eine alternative Bestimmung wäre mit videobasierten Auswerteverfahren zwischen zwei oder mehreren stationären Standorten möglich. Hierzu werden die Kennzeichen bei der Durchfahrt an Ort 1 erfasst und gespeichert und bei Wiedererkennung an Ort 2 die Fahrzeit ermittelt. Aufgrund der verfahrensbedingt kurzfristigen Speicherung der Kennzeichendaten und der damit verbundenen Frage des Datenschutzes wird der Ansatz der Videoaufzeichnung in dieser Arbeit nicht priorisiert. Als realisierbare Lösung sollen daher im Rahmen des Messkonzepts die Fahrzeiten nicht von allen Fahrzeugen, sondern wie bereits in anderen Arbeiten [TKD+03] nur von den Versuchsfahrzeugen ermittelt werden. Da die Fahrzeuge mit einem GPS-Empfänger ausgestattet sein werden, ist durch die

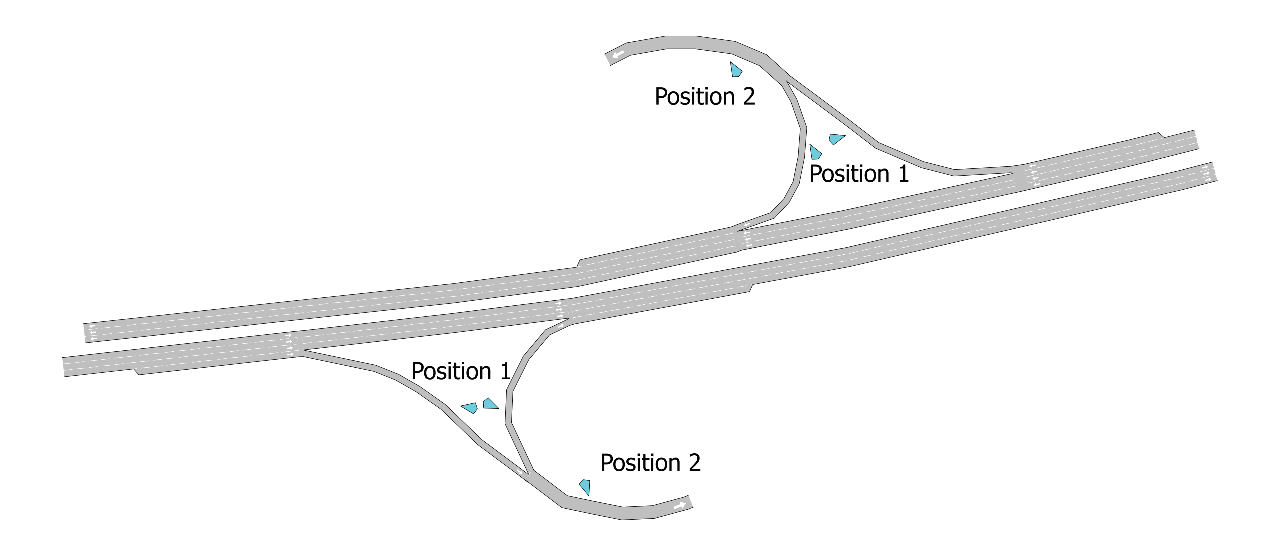


Abbildung 6.6: Luftbild eines planfreien Knotenpunkts mit Standortempfehlung für zusätzliche Sensorik

Kenntnis von Ort und Zeit die Fahrzeitermittlung für beliebige Streckenabschnitte möglich.

Die *Fahrzeugabstände* werden durch die auf der Autobahn A2 installierte Sensorik bereits minütlich aggregiert als mittlere Nettozeitlücke ermittelt. Da diese Kenngröße lokal an einem Ort bestimmt wird, ist diese Größe allerdings nicht geeignet, um den angestrebten Vergleich der in der Simulation nachgebildeten „headway distribution“ des menschlichen Fahrers mit der vom System angestrebten „target headway“ zu realisieren (vgl. Abschnitt 6.2). Die mittlere Nettozeitlücke erfasst insbesondere bei geringem Verkehrsaufkommen auch die Zeitlücken zwischen zwei Fahrzeugen, bei denen die Fahrzeuge für den angestrebten Vergleich nicht als einander folgende Fahrzeuge angesehen werden können.

Aus den empirischen Daten des Versuchsfahrzeugs kann sowohl für das Fahrverhalten des Versuchsfahrers als auch für die nachfolgenden Fahrzeuge die Verteilung der Nettoweglücken bzw. durch Umrechnung auch der Nettozeitlücken für Folgefahrten ermittelt werden. Weiterer Vorteil dabei ist, dass bei dieser Auswertung auch eine geschwindigkeitsabhängige Darstellung der eingehaltenen Nettoweg- bzw. Nettozeitlücken möglich ist.

6.6 Konzept zur Erhebung mikroskopischer Daten aus der Simulation

Um den Vergleich zwischen Empirie und Simulation zu ermöglichen, ist es notwendig, die empirisch erhobenen mikroskopischen Kenngrößen auch in der Simulation zu ermitteln.

Zur Kalibrierung und Validierung der Modelle des Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhaltens sind empirisch der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden bzw. nachfolgenden Fahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen bzw. den Nachbarfahrstreifen messtechnisch zu bestimmen. In den kommerziellen Verkehrssimulationswerkzeugen können diese Größen oft nur über das API aus der Simulation extrahiert werden. Diese erlaubt dann einen direkten Zugriff auf diese Größen während der Simulation und

auf beliebig viele Fahrzeuge gleichzeitig. Die Anzahl der Fahrzeuge ist lediglich durch die notwendige Rechenzeit beschränkt, da die eigenen Erweiterungen der Simulation im API gegebenenfalls relativ rechenintensiv im Vergleich zu den optimierten Abläufen der Standardsimulation sind.

Für die Durchführung der Kalibrierung des Fahrzeugfolgeverhaltens, in dem nur ein Fahrstreifen betrachtet wird, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein anderes Vorgehen gewählt (vgl. Kapitel 9). Um den Datenaustausch zwischen Simulationswerkzeug und Optimierungsalgorithmus zu vermeiden, wurde das im Detail bekannte Fahrzeugfolgemodell extern nachgebildet, sodass das API nicht verwendet werden musste. Damit war es möglich, 10 000 Simulationen pro Folgefahrt für die Optimierung der Parameter in kurzer Rechenzeit durchzuführen.

6.7 Konzept zur Erhebung makroskopischer Daten aus der Simulation

In der Simulation müssen ebenfalls die bereits empirisch erhobenen makroskopischen Kenngrößen bestimmt werden.

Die empirischen Werte für *Verkehrsstärke* und *mittlere lokale Geschwindigkeit* werden häufig mit Induktionsschleifen bestimmt. Simulationswerkzeuge bieten in der Regel standardmäßig die Möglichkeit, diese Sensorik nachzubilden. Bei der Beschreibung der Abbildung des Straßennetzes in der Simulation in Abschnitt 6.3 wurde bereits dargestellt, dass die vorhandene Sensorik der Messquerschnitte in der Simulation nachgebildet werden muss. Im Simulationswerkzeug können die zu bestimmenden Kenngrößen ausgewählt werden, die dann während der Simulation in einer Datenbank gespeichert werden und nach Abschluss der Simulation zur Verfügung stehen. Alternativ kann auch der Zugriff auf die virtuelle Sensorik über das API erfolgen und die Messdaten können bereits während der Simulation weiterverarbeitet und in einem beliebigen Format für eine spätere Nutzung gespeichert werden. Um den Vergleich mit den zuvor beschriebenen empirischen Messdaten zu ermöglichen, sollte die Simulation die Verkehrsstärke und die mittlere lokale Geschwindigkeit mit einem Aggregierungsintervall von einer Minute fahrstreifengenau und getrennt nach Pkw-ähnlichen und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen ermitteln.

Die *Reisezeiten* können standardmäßig in der Simulation häufig nur als mittlere Reisezeit je Streckenabschnitt bestimmt werden und nicht für die einzelnen Fahrzeuge. Die Bestimmung von individuellen Reisezeiten oder von Fahrzeiten über beliebige Streckenabschnitte ist mit der API realisierbar.

Der Vergleich der *Abstände* als Nettoweg- bzw. Nettozeitlückenverteilung der einzelnen Versuchsfahrzeuge ist wie bereits in Abschnitt 6.5 für die empirischen Daten auch in der Simulation nur mit Einzelfahrzeugen möglich. Im vorherigen Abschnitt wurde bereits die Erhebung von Abständen zum vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug in der Simulation mit dem API beschrieben. Über eine entsprechende Aggregation der gemessenen Abstände während der Simulation für ein oder mehrere simulierte Fahrzeuge können damit auch in der Simulation die entsprechenden Verteilungen von Nettoweg- und Nettozeitlücke ermittelt werden.

6.8 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

In diesem Kapitel wurde eine Methode aufgezeigt, ein Verkehrssimulationsmodell sowohl auf mikroskopischer als auch gleichzeitig auf makroskopischer Ebene zu kalibrieren.

Zur Umsetzung der Methode ist die Abbildung des Straßenverkehrsnetzes in der Simulation notwendig sowie die Erhebung von Kenngrößen, die für den Anwendungsfall des VAS die mikroskopische und makroskopische Ebene beschreiben. In diesem Kapitel wurden geeignete aussagekräftige Kenngrößen ermittelt und aufgezeigt, wie diese in der Empirie und in der Simulation erhoben werden können. Die makroskopischen Kenngrößen könnten mit der Unterstützung einer Verkehrsrechnerzentrale sowie zusätzlicher Sensorik insbesondere für die Ein- und Ausfahrten der Autobahnen ermittelt werden. Die mikroskopischen Messdaten sollen mit Einzelfahrzeugen als Versuchsfahrzeuge, die mit entsprechender Sensorik zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden und nachfolgendem Fahrzeug ausgestattet sind, bestimmt werden. Dabei sieht das Messkonzept den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Versuchsfahrzeuge auf einem Streckenabschnitt vor. Die notwendigen simulierten Messdaten können teilweise direkt aus dem Simulationswerkzeug, zum anderen Teil über ein API extrahiert werden.

Die Erhebung der mikroskopischen Messdaten erfolgte mit einem im Rahmen der Arbeit ausgerüsteten Versuchsfahrzeug. Weiterhin standen standen makroskopische Messdaten der Verkehrsrechnerzentrale Hannover zur Verfügung. Aufgrund begrenzter zeitlicher und finanzieller Ressourcen konnte nicht das vollständige Messkonzept umgesetzt werden. Die Untersuchung wurde nur mit einem Versuchsfahrzeug durchgeführt, die zusätzliche lokale Sensorik an den Ein- und Ausfahrten stand nicht zur Verfügung. Erst beim unmittelbaren Einsatz mehrerer Versuchsfahrzeuge könnten die Messgrößen gleichzeitig für einen Streckenabschnitt erhoben werden, die im Rahmen dieser Arbeit nur durch Betrachtung der Messdaten von mehreren Tagen des einen Versuchsfahrzeugs erhoben werden konnten. Letzteres widerspricht aber dem aufgezeigten Ziel, die Messdaten gleichzeitig für einen Streckenabschnitt sowohl auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene zu erheben. Im Folgenden wird daher nicht angestrebt, die vollständige Kalibrierungs- und Validierungsmethode durchzuführen, sondern die Machbarkeit des Messkonzepts und der ganzheitlichen Kalibrierungs- und Validierungsmethode aufzuzeigen.

In den folgenden Kapiteln werden der Aufbau des Versuchsfahrzeugs sowie das verwendete Verkehrssimulationswerkzeug beschrieben. Anschließend wird eine mikroskopische Kalibrierung des Fahrzeugfolgeverhaltens durchgeführt. Eine Methode zur mikroskopischen und makroskopischen Validierung wird vorgestellt und exemplarisch, soweit es mit den vorliegenden Messdaten möglich war, durchgeführt. Die im Folgenden gezeigten Methoden sind dabei bereits für die Messdaten des vollständigen Messkonzepts ausgelegt.

7 Erhebung von empirischen Daten

Das vorgestellte Messkonzept sieht die Erhebung von mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten durch mehrere Versuchsfahrzeuge vor. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Versuchsfahrzeug aufgebaut, um den Nachweis der Machbarkeit des Messkonzepts zu erbringen. In den späteren Auswertungen der Messdaten mussten aufgrund des Einsatzes nur eines Versuchsfahrzeugs die Fahrten von mehreren Tagen betrachtet werden, um die gleiche Datenmenge zu erhalten, die mit mehreren Fahrzeugen gleichzeitig hätten erhoben werden können. Hierdurch ergibt sich zwangsläufig ein fundamentaler Unterschied zum vorgestelltern Messkonzept, da die zeitliche und örtliche Abhängigkeit der mikroskopischen und makroskopischen Daten damit nicht mehr gegeben war. Somit ist hiermit nur die Machbarkeit des Messkonzepts aufzeigbar, nicht aber die Abhängigkeit der makroskopischen von der mikroskopischen Ebene. Der Aufbau des Versuchsfahrzeugs (Abschnitt 7.1) sowie die notwendige Messdatenaufbereitung (Abschnitt 7.2) sind in diesem Kapitel beschrieben. Dieses Kapitel stellt die Versuchsstrecke, ein Streckenabschnitt der Autobahn A2, dar (Abschnitt 7.3) und nennt den Umfang der Messungen (Abschnitt 7.4). Die von der Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) Hannover zur Verfügung gestellten makroskopischen Daten der entlang des betrachteten Autobahnabschnitts vorhandenen Messquerschnitte (MQ) werden abschließend in diesem Kapitel beschrieben (Abschnitt 7.5).

7.1 Aufbau eines Versuchfahrzeugs

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Versuchsfahrzeug aufgebaut und eingesetzt, dessen Funktion und Aufbau im Folgenden beschrieben wird. Die technischen Kenndaten des Versuchsfahrzeugs sind in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Tabelle 7.1: Technische Daten des Versuchsfahrzeugs

Fahrzeugtyp	VW Passat Variant 2.0 TDI DSG
Nennleistung [$kW(PS)$]	125 (170)
max. Drehmoment [Nm bei $1/min$]	359 / 1750 - 2500
Hubraum [cm^3]	1968
Leergewicht [kg]	1534
Länge/Breite/Höhe [mm]	4774/1820/1517
Baujahr	2006

Der Gesamtaufbau des Versuchsfahrzeugs ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

Zur Erhebung mikroskopischer Einzelfahrzeugdaten musste der Zugriff auf die fahrzeugeigenen Messgrößen, wie z. B. Fahrzeuggeschwindigkeit, erfolgen, sowie eine Objekterkennung des vorausfahrenden und des nachfolgenden Fahrzeugs mit Bestimmung der Abstände und der Relativgeschwindigkeiten zu diesen Fahrzeugen realisiert werden.

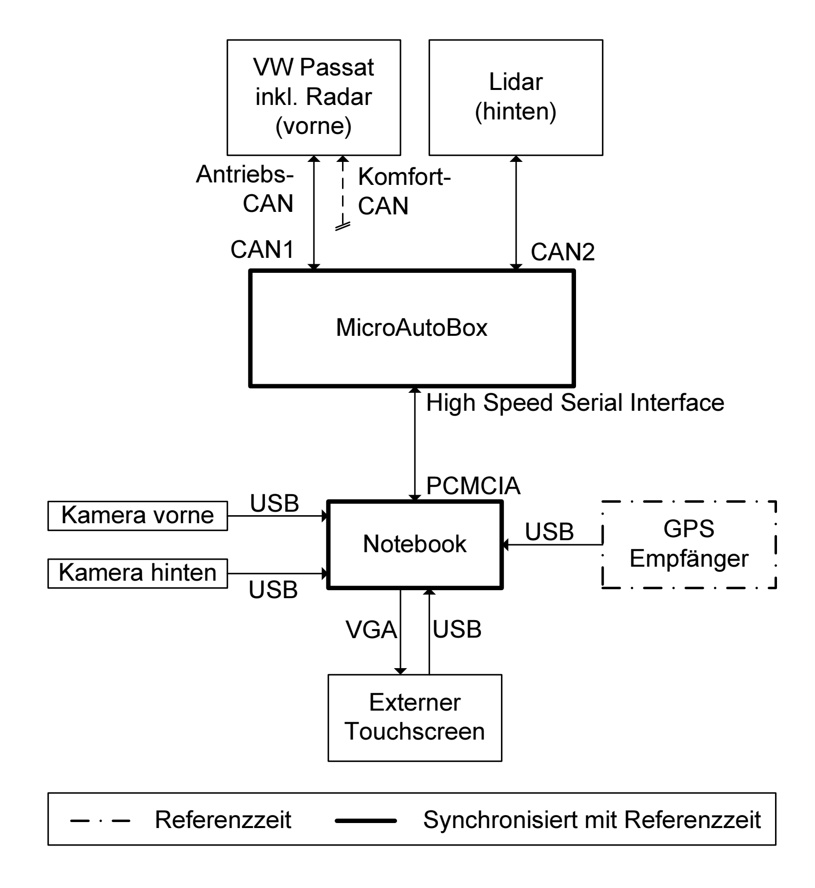


Abbildung 7.1: Hardwarestruktur des Versuchfahrzeugs

Die fahrzeugeigenen Messgrößen sind herstellerseitig auf mehreren fahrzeugeigenen CAN-Bussystemen [Die07] vorhanden. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Anschluss an den sogenannten Antriebs-CAN und Komfort-CAN des Fahrzeugs realisiert. Mithilfe einer MicroAutobox, einer kompakten, eigenständigen Prototyping-Einheit der Firma dSpace, wurden ausgewählte Signale mit dem Softwarewerkzeug Control Desk auf einem Notebook aufgezeichnet. Ein Signal kann z.B. einen Messwert von genau einer Messgröße oder auch eine Statusinformation zum Austausch zwischen den Steuergeräten enthalten. Mehrere Signale bilden eine Nachricht, die von einem Steuergerät auf dem Bus gesendet wird. Von den mehreren Tausend vorhandenen Signalen wurde nur eine kleine Auswahl an Signalen vom Antriebs-CAN aufgezeichnet, die in Tabelle 7.2 aufgelistet ist. Für zukünftig durchzuführende Auswertungen wurden mehr Signale aufgezeichnet, als für die geplanten Auswertungen notwendig waren. Eine Auswahl dieser Signale ist ebenfalls in Tabelle 7.2 gezeigt. Der Anschluss an den Komfort-CAN wurde im Rahmen der Arbeit nicht genutzt.

Das Fahrzeug besitzt in der vorliegenden Ausstattungsvariante bereits ein ACC-System und somit bereits einen Radar-Sensor (Radio Detection and Ranging) der Firma TRW, der im Frontbereich hinter dem Volkswagen-Logo montiert ist. Im normalen Betrieb sendet dieser Sensor über den Antriebs-CAN Botschaften an das Motorsteuergerät. Die MicroAutoBox wurde dazu genutzt, dem Sensor spezielle sogenannte Entwicklungsbotschaften zu senden. Dadurch wird der Sensor veranlasst, zusätzliche Botschaften auf dem Antriebs-CAN zu senden, in denen die Objekteigenschaften von bis zu acht erkannten Objekten enthalten sind. Tabelle 7.3 zeigt eine Auswahl der aufgezeichneten Signale vom Radar-Sensor. Das vorausfahrende Fahrzeug und damit das für das ACC-System relevante Ob-

Tabelle 7.2: Aufgezeichnete Signale des Antriebs-CAN-Busses des Versuchträgers und deren Verwendung

CAN Signal \ Verwendung	Fahrzeugfolgeverhalten	Fahrstreifenwechselverhalten	Umgebungsbedingungen	Anzeige (HMI)	Eingangsdaten Lidar-Sensor	zurzeit nicht verwendet
Fahrzeuggeschwindigkeit als Rohsignal vom Tachogeber	•	•		•	•	
Blinker links		•		•		
Blinker rechts		•		•		
Lenkradwinkel		•			•	
Lenkradwinkel Vorzeichen		•			•	
Gierrate					•	
Gierrate Vorzeichen					•	
Fahrer bremst					•	
Wischer vorne läuft			•			
ACC System Status	•					
Motordrehzahl				•		
Angezeigte Geschwindigkeit						•
Fahrpedalwert						•
Kilometerstand						•

jekt ist dabei in den Daten über das Signal „ACC relevantes Objekt“ gekennzeichnet. Die Objektdaten dieser bis zu acht Objekte wurden ebenfalls mit der MicroAutobox aufgezeichnet.

Für die Objekterkennung nach hinten wurde sich für einen Lidar-Sensor (Light Detection and Ranging) der Firma Hella entschieden, da dieser Sensor bereits erfolgreich in anderen Projekten zur rückwärtigen Objekterkennung in Fahrzeugen eingesetzt worden war. Dieser Sensor wurde über einen eigenen vom Antriebs-CAN des Fahrzeugs unabhängigen CAN-Bus auf die zweite CAN-Busschnittstelle der MicroAutobox angeschlossen. Als Eingangsdaten benötigte der Sensor die eigene Fahrzeuggeschwindigkeit, den Lenkwinkel, die Gierrate sowie die Information, ob der Fahrer zurzeit bremst. Da der vom Sensor zulässige Wertebereich und die erwartete Auflösung dieser Größen teilweise von den auf dem Antriebs-CAN verwendeten Wertebereich und Auflösung abweichen, wurde die notwendige Anpassung auf der MicroAutobox vorgenommen und die aufbereiteten Werte an den Sensor gesendet. Der Sensor liefert für bis zu zehn Objekte vergleichbare Größen wie der vorne verbaute Radarsensor (siehe Tabelle 7.3).

Die technischen Eigenschaften der beiden Sensoren, insbesondere der Merkmale Auflö-

Tabelle 7.3: Ausgewählte Signale des Radar- und Lidar-Sensors (jeweils für ein erkanntes Objekt)

CAN Signal	Radar(TRW)	Lidar (Hella)
Nettoweglücke	•	•
Relativgeschwindigkeit	•	
Absolutgeschwindigkeit		•
Laterale Abweichung	•	
Linke Objektposition		•
Rechte Objektposition		•
Fahrstreifen	•	•
ACC relevantes Objekt	•	•

sung und Genauigkeit sind in Tabelle 7.4 zusammengestellt.

Tabelle 7.4: Technische Eigenschaften der Sensoren zur Beobachtung des vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugs, nach [TRW05], [Hel06]

Größe	Radar (TRW)	Lidar (Hella)
Opening angle (azimuth)	± 6 °	± 6 °
maximum sensor range (undistorted visibility)	200 m	200 m
Distance resolution	k.A.	0,1 m
Distance accuracy	± 5 % oder 1 m	better than ± (1 % + 1 m)
Relative velocity resolution	k.A.	0,1 km/h
Relative velocity accuracy	± 0,1 km/h	± 1,8 km/h
Lateral deviation resolution	k.A.	1 °
Lateral deviation accuracy	± 0,3 °	1 °
Reaction time (new object)	k.A.	300 ms
Reaction time (vanishing object)	k.A.	300 ms

Im Gegensatz zum Sensor vorne am Fahrzeug, liefert der Lidar-Sensor für die erkannten Objekte keine Relativgeschwindigkeiten, sondern Absolutgeschwindigkeiten. Da der Sensor für den Einbau im Fahrzeug vorne konzipiert ist, liefert der Sensor bei dem von uns gewählten Einbau nach hinten schauend eine falsche Absolutgeschwindigkeit. Die falsche Geschwindigkeit resultiert aus dem verwendeten Messverfahren und der Auswertung auf dem Sensor, die für den Einbau vorne am Fahrzeug ausgelegt ist.

Beim Messverfahren wird der Abstand zum erkannten Objekt bestimmt. Aus der Eigengeschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs zusammen mit der Änderung des Abstandes bestimmt der Sensor die Absolutgeschwindigkeit des Objektes. Abbildung 7.2 zeigt eine Situation für die Zeitpunkte t_0 und $t_0 + \Delta t$, in der der Abstand zu einem nachfolgenden Fahrzeug größer wird. Der Sensor nimmt an, dass dieses Fahrzeug vor dem Versuchsfahrzeug unterwegs ist. Dieses nicht real existierende Fahrzeug ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Aus dem größer werdenden Abstand Δs_v berechnet der Sensor aufgrund der Annahme eines vorausfahrenden Fahrzeugs eine Absolutgeschwindigkeit v_v für dieses Objekt, die größer als die Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs v_M ist. In Wirklichkeit

befindet sich das Objekt aber hinter dem Versuchsfahrzeug, sodass bei größer werdendem Abstand Δs_h eine Objektgeschwindigkeit v_h bestimmt werden muss, die kleiner als die des Versuchsfahrzeugs ist. Diese falsche Absolutgeschwindigkeit wurde bereits vor der Datenaufzeichnung auf der MicroAutobox nach Formel (7.1) korrigiert.

$$v_h = 2 \cdot v_M - v_{gemessen} \tag{7.1}$$

mit

v_h	berichtigte Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs
v_M	Messwert der Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs (vom Antriebs-CAN) (km/h)
$v_{gemessen}$	Messwert (vom Sensor ermittelt) der Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs

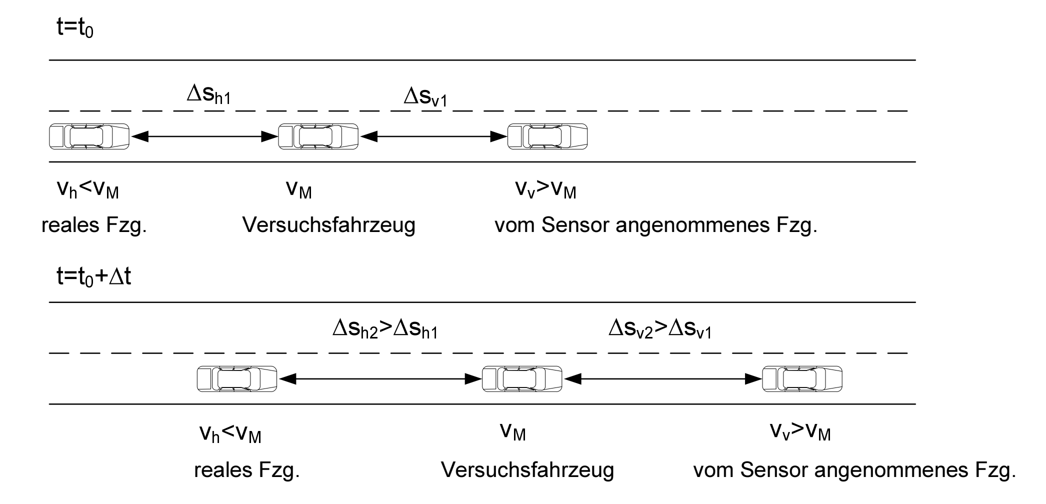


Abbildung 7.2: Grafische Darstellung zur notwendigen Umrechnung der Objektgeschwindigkeit für den Lidar-Sensor

Die Aufzeichnung aller oben genannten Signale auf der MicroAutobox geschieht mit 100 Hz. In anderen Arbeiten, in denen Messdaten von Einzelfahrzeugen erhoben wurden, wurden die Messdaten häufig lediglich mit 10 Hz aufgezeichnet. Da der Radar- und der Lidar-Sensor alle 60 ms die aktuellen Objektdaten sendet, würden bei 10 Hz nicht alle gesendeten Objektdaten aufgezeichnet werden können.

Obige Konfiguration wäre bereits als Minimalkonfiguration für das zuvor beschriebene Messkonzept ausreichend gewesen. Obwohl die Messdaten später größtenteils automatisiert ausgewertet wurden, sollte die Möglichkeit gegeben sein, sich die genaue Verkehrssituation rückblickend anzusehen. Hierzu wurde hinter der Front- und Heckscheibe des Fahrzeugs je eine Webkamera montiert. Die Videodaten der Kameras wurden ebenfalls auf dem Notebook aufgezeichnet und bereits bei der Aufnahme mit einem Zeitstempel versehen.

Ergänzend wurden mit einem GPS-Empfänger die Positionsdaten des Fahrzeugs während der Fahrt aufgezeichnet. Die empfangene GPS-Zeit wurde dabei zur Korrektur der Uhrzeit des Notebooks und der Uhrzeit der MicroAutobox verwendet. Mit den Positionsdaten wurde bei der automatischen Verarbeitung der Messdaten realisiert, dass Versuchsfahrten



Abbildung 7.3: Beispiele für Aufnahmen der im Versuchsfahrzeug hinter der Front- und Heckscheibe montierten Kameras

auf Autobahnen von Fahrten abseits der Autobahnen unterschieden werden konnten (siehe Abschnitt 7.2). Das Messkonzept sieht den gleichzeitigen Einsatz von mehreren gleichartig ausgestatteten Versuchsfahrzeugen vor. Die Verwendung von GPS hat dabei den Vorteil, dass mit der GPS-Zeit auch mehrere Fahrzeuge standortunabhängig auf eine einheitliche Zeitbasis gebracht werden können.

Auf der Seite des Beifahrers wurde ergänzend ein LCD-Monitor montiert, auf dem in kompakter Darstellung eine Auswahl an Messgrößen während der Fahrt angezeigt wurden (Abbildung 7.4). Fehler bei der Inbetriebnahme des Systems konnten vom Fahrer damit schnell wahrgenommen werden und somit vom Benutzer zu verantwortende Ausfälle vermieden werden. Um auf Strecken mit Wechselverkehrszeichen die dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen erfassen zu können, wurde die Oberfläche zur Anzeige der aktuellen Messdaten auf dem LCD-Monitor erweitert, sodass dank der Touchscreenfunktionalität der Fahrer während der Fahrt die aktuelle Geschwindigkeitsbeschränkung eingeben kann. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen weitere besondere Vorkommnisse, wie z. B. Baustellen, während der Fahrt über den Touchscreen in den Messdaten kenntlich zu machen.

7.2 Messdatenaufbereitung

Die mit dem Versuchsfahrzeug während der Fahrt aufgezeichneten Messdaten mussten zur Weiterverwendung entsprechend aufbereitet werden. Die Abbildung 7.5 zeigt den Datenfluss der Messdaten von den Rohdaten bis zu den bereits separierten einzelnen Fahrzeugfolgedatensätzen. Die dargestellte Datenaufzeichnung und -bearbeitung wurde mit dem in Abbildung 7.1 gezeigten Notebook durchgeführt, das in Abbildung 7.5 nicht explizit dargestellt ist.

Während der Messfahrt werden mit dem Softwarewerkzeug ControlDesk der Firma dSpace die Messdaten der MicroAutoBox auf dem Notebook aufgezeichnet. Die resultierende iDF Datei dient dabei als Container für alle aufzuzeichnenden Signale vom Antriebs-CAN und dem angeschlossenen Lidar-Sensor. Auf dem Notebook wird gleichzeitig mit der

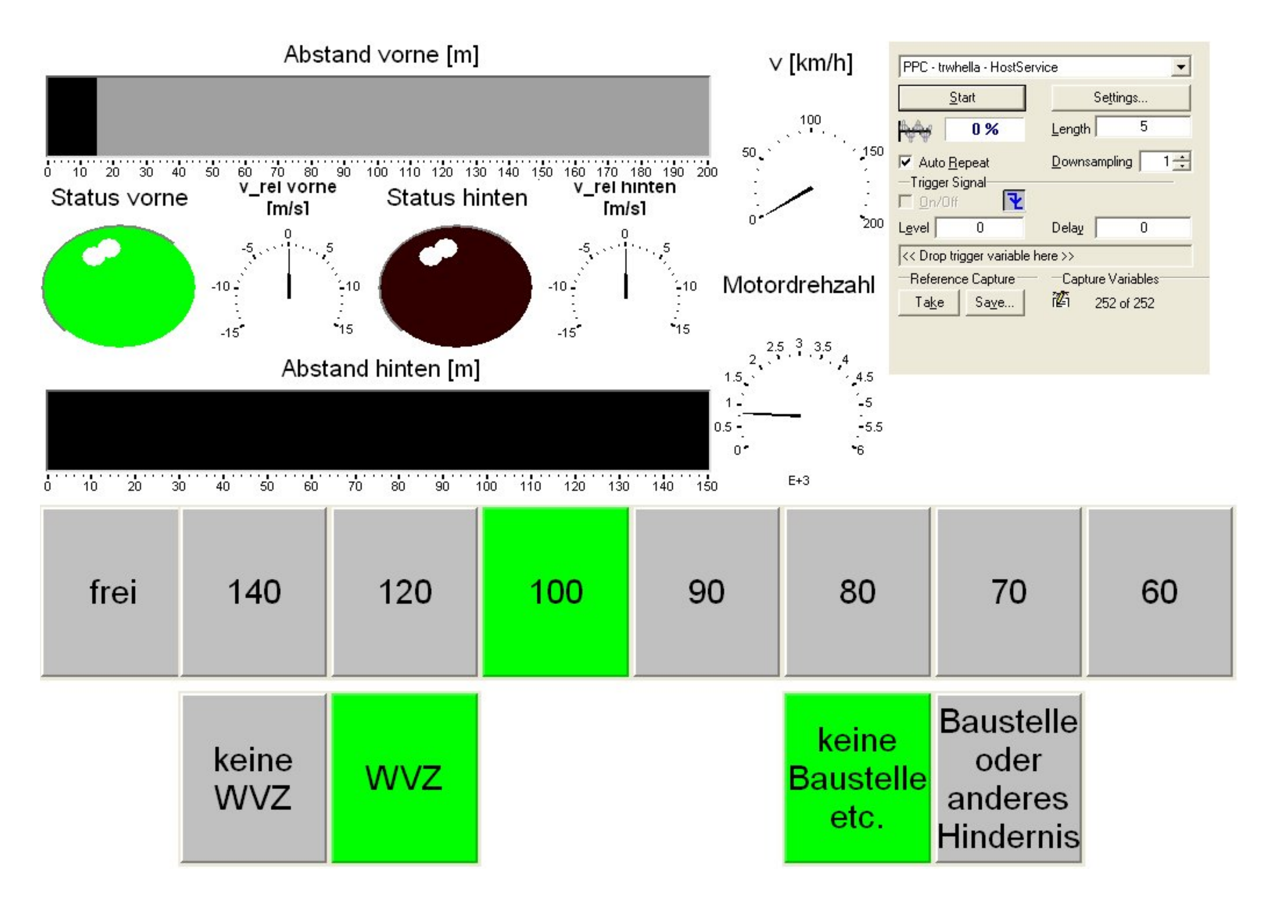


Abbildung 7.4: Darstellung ausgewählter Messgrößen sowie Eingabemaske für Geschwindigkeitsbeschränkungen, Wechselverkehrszeichen und Baustellen auf dem LCD Touchscreen

Software U-Center sekündlich das Signal vom GPS-Empfänger im NMEA-Format in einer UDX-Datei gespeichert. Die Videoaufnahmen sind in der Abbildung nicht dargestellt, da sie nicht zur automatischen Auswertung verwendet werden.

Nach Abschluss der Messfahrt muss die iDF-Datei mit der Software Control Desk konvertiert werden, um die Messdaten in Matlab weiterverwenden zu können. Dabei wird für jedes aufgezeichnete Signal (siehe Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3) eine Matlab-MAT-Datei erzeugt.

Im Rahmen der Untersuchung sollten nur Fahrten auf Autobahnen berücksichtigt werden. Der Vergleich der gemessenen Fahrzeugposition des GPS-Empfängers mit einer digitalen Karte ermöglicht die Unterscheidung von Fahrten auf Autobahnen und Fahrten auf anderen Straßen. Mit dieser Art der Auswertung ist, im Vergleich zu einer Auswertung, die von den gefahrenen Kilometern abhängig ist, auch sichergestellt, dass unabhängig von der benutzten Ein- und Ausfahrt nur Fahrten auf der ausgewählten Autobahn berücksichtigt werden.

Als digitale Karte wurde das Kartenmaterial von OpenStreetMap (OSM) [OSM10] verwendet. OSM ist ein im Juli 2004 gestartetes Internet-Projekt mit dem Ziel eine freie Weltkarte zu schaffen. OSM bietet seine Daten sowohl in Rohform als auch in Form von gerenderten Weltkarten an, wie z. B. auf der Startseite von OSM eine aus diesen Rohdaten gerenderte Karte dargestellt ist. Jeder Interessent hat die Möglichkeit über das Internet selbst an der Vervollständigung und Korrektur der vorhandenen Daten mitzuwirken. Im Rahmen der Arbeit wurde mithilfe der freien Software JOSM auf den

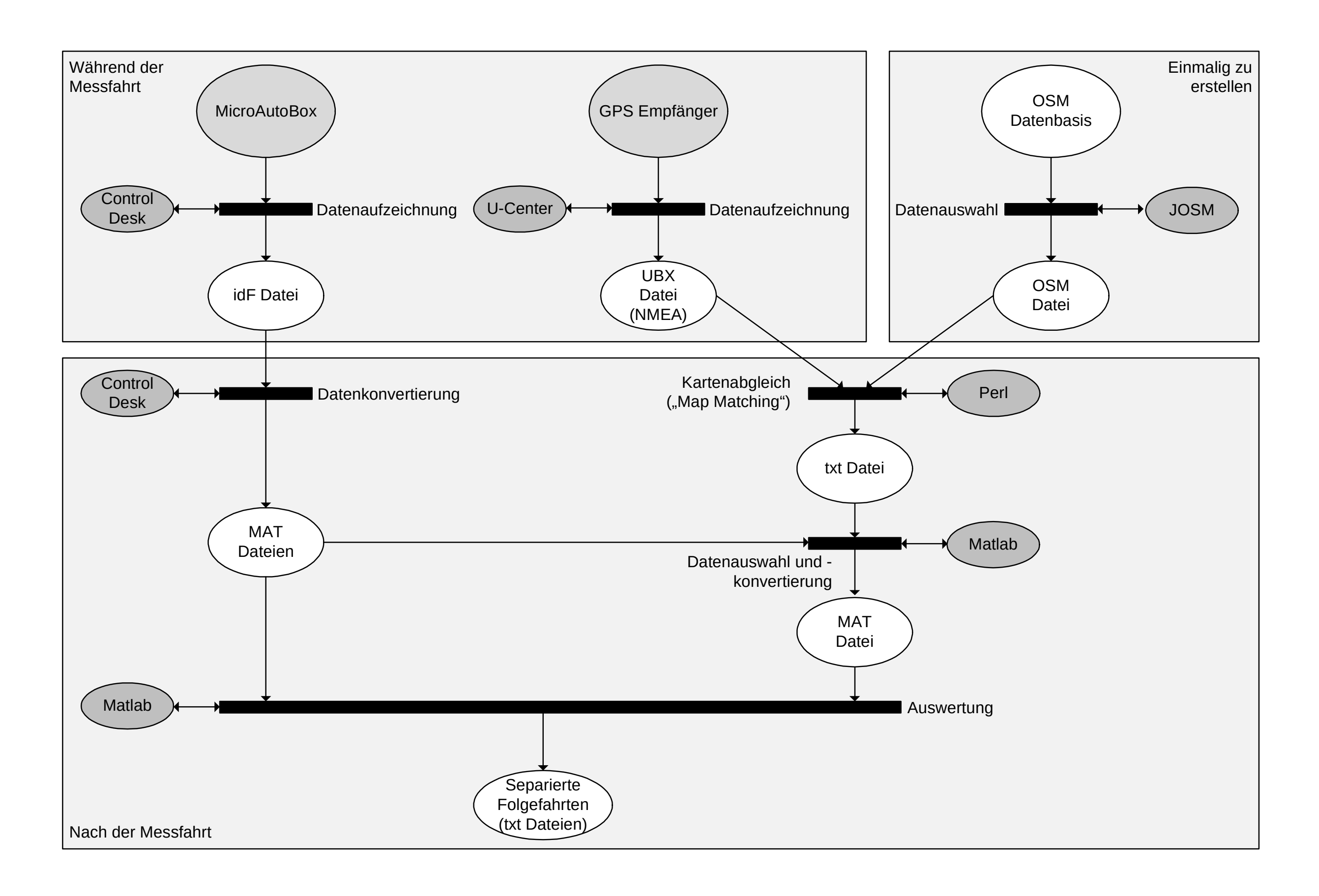


Abbildung 7.5: Datenfluss der Weiterverarbeitung der Messdaten des Versuchsfahrzeugs

Datenserver der Rohdaten von OSM zugegriffen. Die zu betrachtende Autobahn wurde in JOSM ausgewählt, um anschließend die Rohdaten dieser Autobahn im XML-Format in eine OSM-Datei zu extrahieren. In dieser Datei sind die Grundelemente der ausgewählten Autobahn, die sogenannten Knoten und Wege, enthalten. Diese Elemente besitzen eine Reihe von Eigenschaften. In dieser Arbeit wurden insbesondere die „keys“ „highway“ zur Spezifikation des Straßentyps und „maxspeed“ zur Angabe einer ggf. vorhandenen Geschwindigkeitsbeschränkung ausgewertet. „highway“ kann dabei unter anderem die Werte „motorway“ oder „motorway-link“ annehmen. „maxspeed“ kann neben Zahlenwerten auch den Wert „signals“ annehmen, um anzugeben, dass auf dem Streckenabschnitt Wechselverkehrszeichen installiert sind. Nachdem die OSM-Datei extrahiert wurde, kann diese Datei für die folgende Auswertung aller Fahrten auf der ausgewählten Autobahn verwendet werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Programm in der Programmiersprache Perl entwickelt, um einen Kartenabgleich, auch „Map Matching“ genannt, zwischen der aufgezeichneten Fahrzeugposition in der UBX-Datei und den ausgewählten OSM-Daten zu realisieren. Das Perlprogramm sortiert hierzu die Wege, die in der OSM-Datei unsortiert vorliegen, um zwei Strecken zu generieren, wobei jede Strecke eine Fahrtrichtung der Autobahn beschreibt. Das Perlprogramm vergleicht die aktuelle Fahrzeugposition und die aktuell gefahrene Richtung mit den Daten der zwei generierten Strecken. Mit diesem Vergleich ist es möglich, festzustellen, wann und wo auf die Autobahn auf- bzw. von der Autobahn abgefahren

wurde. Zu jedem Zeitstempel der UBX-Datei mit den GPS-Positionsdaten ermittelt das Perl-Programm, ob das Fahrzeug zum betreffenden Zeitpunkt auf der Autobahn war, und falls ja, ob bzw. welche Geschwindigkeitsbeschränkung auf dem befahrenden Streckenabschnitt vorliegt. Tabelle 7.5 zeigt das Ergebnis eines erfolgreichen Kartenabgleichs für eine Fahrt von Braunschweig nach Hannover auf der Autobahn A2 in gekürzter Darstellung.

Tabelle 7.5: Ergebnisdarstellung des Kartenabgleichs für eine Messfahrt (gekürzte Darstellung)

Time	Speed Limit	UBX lat	UBX lon	Route	no.	junction name
79985	signals	52.314625	10.5180717	A 2	55	Kreuz Braunschweig-Nord
80088	120	52.3261833	10.469015	A 2	54	Braunschweig-Hafen
80179	120	52.3349233	10.4225433	A 2	53	Braunschweig-Watenbüttel
80472	120	52.3364617	10.2689283	A 2	52	Peine
80768	120	52.36367	10.1205033	A 2	51	Hämelerwald
80957	120	52.3820167	10.0226433	A 2	50	Lehrte-Ost
81053	signals	52.3901117	9.9672917	A 2	49	Lehrte
81156	signals	52.3965017	9.9060817	A 2	48	Kreuz Hannover-Ost
81238	signals	52.4102317	9.8523883	A 2	47	Kreuz Hannover-Buchholz
81274	signals	52.4208067	9.834505	A 2	46	Hannover-Lahe
81357	signals	52.4281	9.7797967	A 2	45	Hannover-Bothfeld
81429	signals	52.42755	9.7409283	A 2	44	Hannover/Langenhagen

Um die spätere Weiterverwendung der Daten in Matlab zu vereinfachen, wurde in der ersten Spalte die Zeitangabe in Sekunden ab Mitternacht angegeben. Die zweite Spalte enthält die vorgegebene Maximalgeschwindigkeit bzw. die Angabe „signals“ für Streckenabschnitte mit Wechselverkehrszeichen. Spalten 3 und 4 enthalten die Positionsangaben der aktuellen Einfahrt, die in Spalte 6 und 7 mit Nummer und Name angegeben ist. Spalte 5 enthält die Nummer der Autobahn. Das Perl Programm liefert mehrere Ausgabedateien. Die obige Darstellung ist lediglich die Datei der Zusammenfassung der Auswertung, die für den Anwender zur Übersicht vorgesehen ist. Die Textdatei zur Weiterverwendung enthält für jeden Eintrag in der UBX-Datei (sekündlich) eine Angabe der vorliegenden Geschwindigkeitsbeschränkung. Diese Textdatei wird anschließend in eine Matlab-MAT-Datei umgewandelt. Hierbei werden nur die Daten berücksichtigt, für die in diesem Zeitraum auch Messdaten der MicroAutobox vorhanden sind. Für die zeitliche Zuordnung der mit der MicroAutobox aufgezeichneten Daten und dem Ergebnis des Map Matching, wird bei der Messdatenaufzeichnung auf der MicroAutobox ebenfalls die Anzahl der verstrichenen Sekunden seit Mitternacht aufgezeichnet. Um die korrekte zeitliche Zuordnung sicherzustellen, wird die Uhrzeit der MicroAutobox vor jeder Messfahrt mit der GPS-Uhrzeit synchronisiert (siehe Abbildung 7.1).

Auf Basis der erstellten MAT-Dateien fand jede weitere Bearbeitung stand. Insbesondere wurde ein Matlabskript erstellt, das alle Fahrten, in denen ein Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen vor bzw. hinter dem Fahrzeug länger als 10 s beobachtet wurde, in separate Dateien extrahiert. Diese Einzeldateien wurden für eine spätere Auswahl der Folgefahrten verwendet.

7.3 Versuchsstrecke

Um die Messfahrten zeitlich flexibel durchführen zu können, sollten die Messungen auf Autobahnen möglichst in der näheren Umgebung von Braunschweig durchgeführt werden. Um umfangreiche Messdaten zu erhalten, wurde sich dafür entschieden, dass ein Mitarbeiter aus Hannover täglich mit dem Versuchsfahrzeug zur Arbeit anreist.

Die Versuchsstrecke war damit auf die Strecke zwischen dem Institut und dem Stadtteil Hannover List festgelegt. Die Strecke führte vom Institut über den Braunschweiger Ring, auf die Autobahnen A392 und A391 und schließlich auf die Autobahn A2 an der Anschlussstelle 55 Kreuz Braunschweig-Nord. An der Ausfahrt 44 Hannover/Langenhagen wurde die Autobahn A2 verlassen, um weiter nach Hannover List zu fahren. Die Strecke auf der Autobahn A2 ist dabei insgesamt 57 km lang, davon sind 37 km zwischen Braunschweig-Nord und Lehrte-Ost mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 120 km/h beschränkt. Die verbleibenden 20 km der Strecke zwischen Lehrte-Ost und Hannover/Langenhagen sind mit Wechselverkehrszeichen ausgerüstet. Abbildung 7.6 zeigt den entsprechenden Streckenabschnitt. Die Kenndaten der Strecke sind in Tabelle 7.6 zusammengefasst.

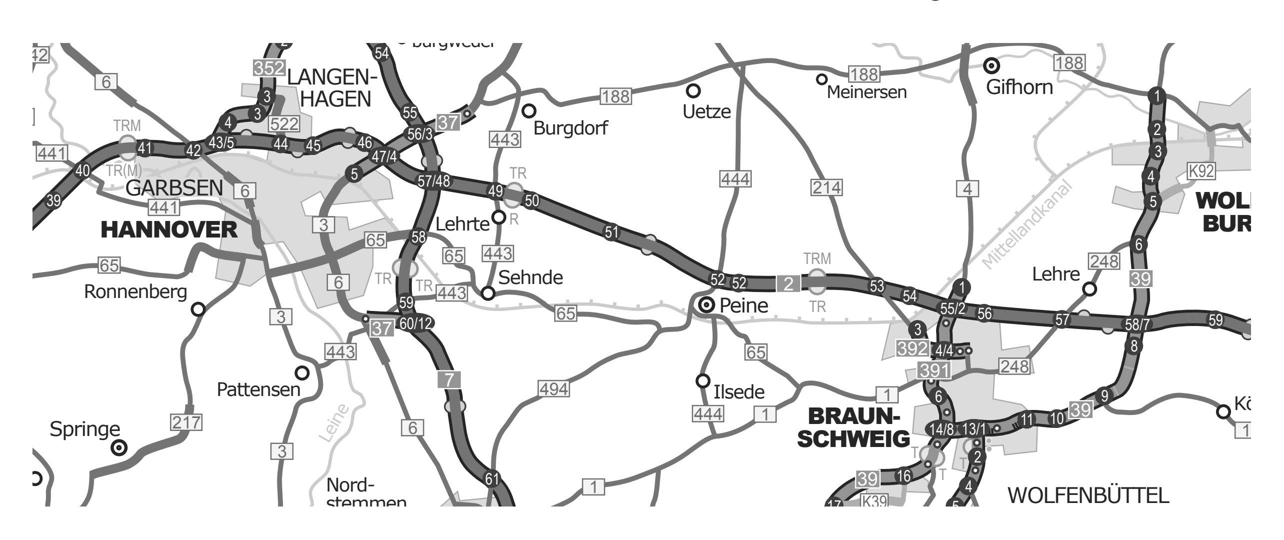


Abbildung 7.6: Versuchsstrecke, aus [Aut10]

Tabelle 7.6: Kenndaten der Versuchsstrecke

Gesamtstreckenlänge	71 km
Streckenlänge nur A2	57 km
Geschwindigkeitsbeschränkung 120 km/h (A2)	37 km
Wechselverkehrszeichen (A2)	20 km
Anzahl Fahrstreifen (A2)	3

In einigen wenigen Fahrten von Braunschweig nach Hannover wurde die Autobahn bereits an der Ausfahrt 47 Kreuz Hannover-Buchholz oder Ausfahrt 45 Hannover-Bothfeld verlassen. Hierdurch wurde die Gesamtstreckenlänge verkürzt, im Fall der Ausfahrt in Hannover-Bothfeld z. B. auf 64 km. Die Fahrt von Hannover nach Braunschweig fand auf derselben Strecke statt. Aufgefahren auf die Autobahn wurde in den meisten Fahrten in Hannover/Langenhagen, in einigen anderen Fahrten in Hannover-Bothfeld.

7.4 Umfang der Messungen

Tabelle 7.7 gibt einen Überblick über den Umfang der vorgenommenen Messfahrten.

Tabelle 7.7: Umfang der Messfahrten

Erhebungszeitraum	Oktober-Dezember 2009
Gesamtanzahl Fahrten	45
Gesamtstreckenlänge (45 Fahrten)	3147 km
Gesamtstreckenlänge (45 Fahrten (nur A2))	2504 km
Anzahl Fahrten bei Regen	11
Anzahl Fahrten nach Schneefall	3

Insgesamt 45 Messfahrten wurden im Zeitraum von Mitte Oktober bis Ende Dezember 2009 durchgeführt. Dabei wurde eine Gesamtstrecke von mehr als 3000 km gefahren. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden die GPS-Messdaten und das Kartenmaterial von OSM dafür genutzt, Fahrten auf der Autobahn von Fahrten außerhalb der Autobahn zu trennen. In dieser Arbeit wurden nur die Fahrten auf der Autobahn A2 betrachtet, die mehr als 2500 km ausmachten. An 11 Tagen regnete es mindestens auf einem Teilstück der Strecke oder die Fahrbahn war noch nass. In den Tagen kurz vor Weihnachten wurden drei Messfahrten durchgeführt, nachdem es geschneit hatte und die Fahrbahn bereits vom Schnee geräumt war.

Die Abbildung 7.7 zeigt die Anzahl der Messfahrten in Abhängigkeit der Uhrzeit zu denen der Mitarbeiter morgens mit dem Versuchsfahrzeug nach Braunschweig und am späten Nachmittag bzw. abends zurück nach Hannover losgefahren ist. In Abhängigkeit der Verkehrssituation dauerten die Fahrten zwischen 40 und 105 Minuten (Abbildung 7.8).

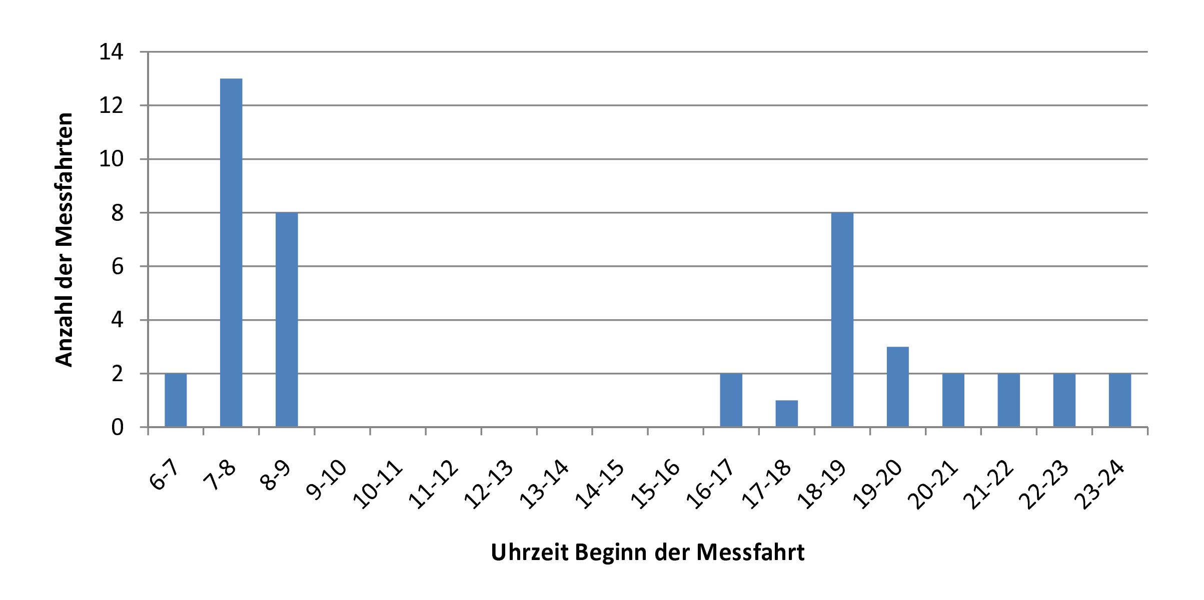


Abbildung 7.7: Uhrzeit des Beginns der Messfahrten

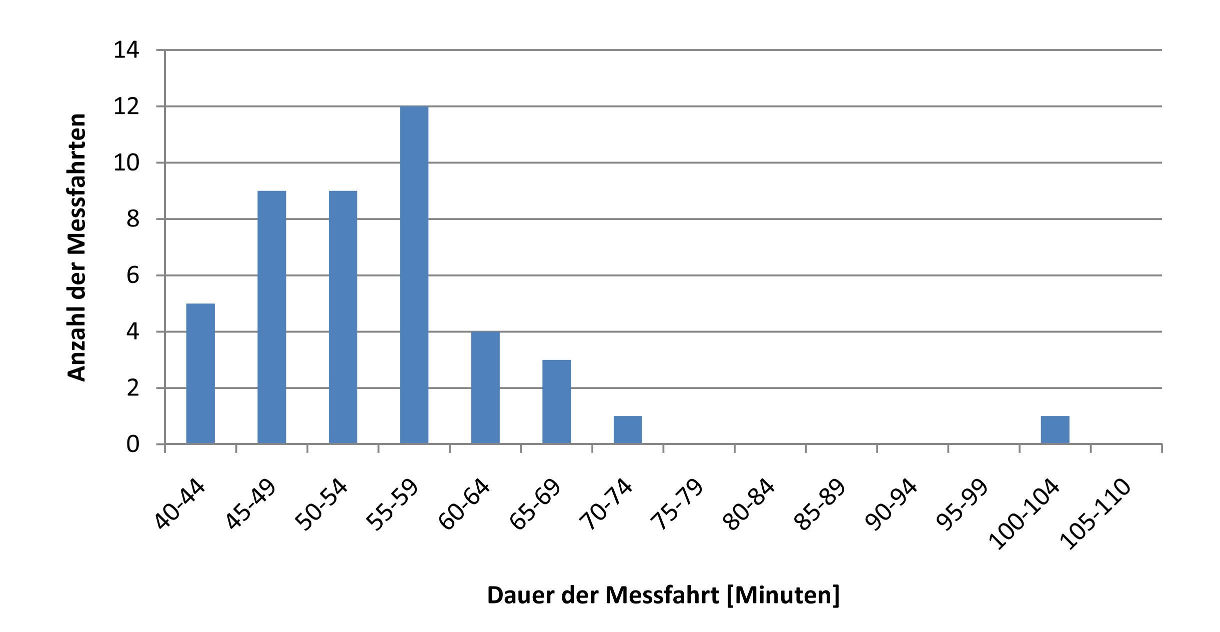


Abbildung 7.8: Dauer der Messfahrten

7.5 Messdatenerhebung durch die Verkehrsrechnerzentrale Hannover

Die Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) Hannover hat dem Institut archivierte Datensätze von ausgewählten Messquerschnitten für den Streckenabschnitt Hannover-Langenhangen bis Braunschweig-Nord für den Zeitraum von Anfang November bis Ende Dezember 2009 zur Verfügung gestellt. Insgesamt sind dies Datensätze für 20 Messquerschnitte entlang der genannten Strecke. 18 davon liegen zwischen Hannover-Langenhagen und Lehrte-Ost, deren Lage in Abbildung 7.9 dargestellt ist. Die Messdaten für zwei weitere Messquerschnitte am Anschluss Braunschweig-Nord lagen ebenfalls vor. Zwischen Lehrte-Ost und Braunschweig-Nord sind damit für ca. 34 km keine Messdaten vorhanden. Nach Auskunft der Nds. Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr ist geplant in 2011 die Ausstattung dieses Abschnitts mit entsprechender Sensorik und Wechselverkehrszeichen fertigzustellen, sodass in zukünftigen Messungen für die Gesamtstrecke Messdaten durch die VRZ erhoben werden. Die erhobenen Kenngrößen wurden bereits in Kapitel 2 in Tabelle 2.2 im Rahmen der Diskussion zum Fundamentaldiagramm dargestellt.

Die Kenngrößen lagen in 1-Minuten-Intervallen fahrstreifengenau vor. Die Struktur der erhaltenen Messdaten hätte die weitere Auswertung in Matlab oder Excel stark erschwert. Daher wurde ein Perl-Skript erstellt, das automatisch die Struktur und einige Inhalte (z. B. Zeichen zur Darstellung fehlender Messwerte) für die Weiterverarbeitung in Matlab anpasste.

Vor der Weiterverwendung der Daten ist die Datenqualität zu überprüfen. Eine Übersicht über Ansätze zur Bewertung der Datenqualität, den entsprechenden Richtlinien sowie dem Stand der Wissenschaft ist in der Arbeit von Lehnhoff [Leh05] gegeben. Zu den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Qualitätsprüfungen der verwendeten Messdaten gehörte die Prüfung auf Plausibiltät sowie der Zuverlässigkeit, d.h. ob die Daten zeitlich

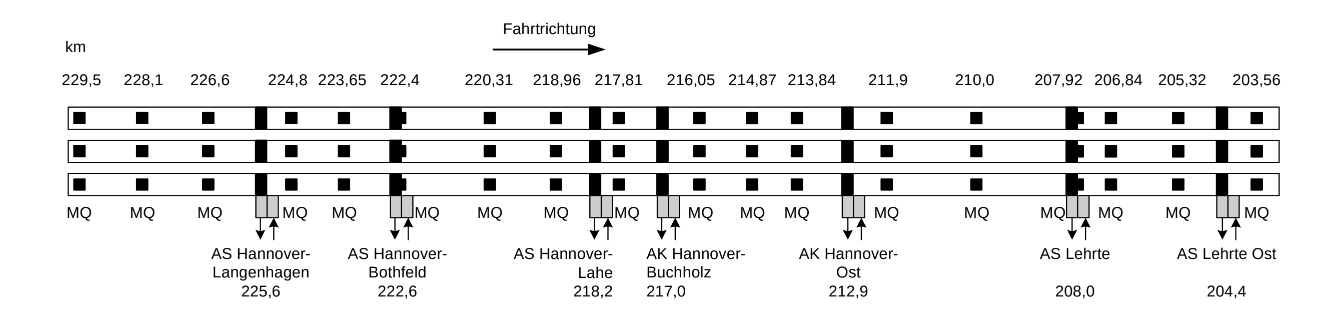


Abbildung 7.9: Messquerschnitte des Streckenabschnitts der A2 von Hannover-Langenhagen bis Lehrte-Ost (vereinfachte Darstellung)

und räumlich konstant erhoben wurden.

Bei der Überprüfung wurde die Kenntnis über die Sensorstandorte und des Streckenverlaufs mit einbezogen. Dies ermöglicht die Kontrolle, ob die Fahrzeuganzahl an zwei aufeinanderfolgenden Messquerschnitten, zwischen denen keine Ein- oder Ausfahrt vorhanden ist, bei der Betrachtung eines Zeitraumes von einem Tag ungefähr übereinstimmen. Ebenso sollte der Pkw- und Lkw-Anteil überprüft werden. Ein unterschiedliches Alter der verwendeten Sensorik, unterschiedliche Einstellungen der Sensorik oder ggf. sogar unterschiedliche Arten von verwendeter Sensorik entlang der Strecke (z. B. Induktionsschleifen und Radarsensoren) können eine unterschiedliche Erkennung von Fahrzeuganzahl und Anteilen von Pkw und Lkw verursachen.

Bei der Verwendung der Daten in Kapitel 10 fiel auf, dass am Messquerschnitt bei km 224,80 am 11.11.2009 ca. 3000 Fahrzeuge mehr detektiert wurden als am nachfolgenden Messquerschnitt bei km 223,65, obwohl außer einem Rastplatz keine Ein- und Ausfahrten zwischen den Messquerschnitten vorhanden sind. Die Ursache hierfür war auf fehlende Messdaten für den Messquerschnitt bei km 223,65 zurückzuführen. Der Messquerschnitt lieferte mehrmals am Tag für wenige Minuten keine Messdaten. Obwohl die Einzelausfälle nur wenige Minuten betrafen, summierte sich die Anzahl an fehlenden Fahrzeugen über diesen Tag auf ca. 3000. Auch an weiteren Tagen konnten diese kurzfristigen Ausfälle beobachtet werden. Beim Vergleich der Empirie mit der Simulation sind diese Ausfälle dementsprechend zu beachten.

Die Überprüfung des Lkw-Anteils ergab, dass der Messquerschnitt bei km 218,96 für den gesamten betrachteten Zeitraum von November und Dezember im Durchschnitt einen Lkw-Anteil von 30 % erkannte, der davor liegende Messquerschnitt bei km 220,31 allerdings nur einen Lkw-Anteil von 20 %, obwohl dazwischen keine Ein- und Ausfahrten mit Ausnahme eines Rastplatzes (deren auf- und abfahrende Lkw bei dem gewählten Beobachtungszeitraum in Summe zu null angenommen werden können), aufwies.

Auch dieser Messfehler ist beim Vergleich der Empirie mit der Simulation zu beachten.

8 Erhebung von Simulationsdaten

Zur Erhebung von Daten aus einer Simulation muss zuerst eine Auswahl für ein Simulationsmodell bzw. Simulationswerkzeug getroffen werden. Frei verfügbare OpenSource-Werkzeuge haben den Vorteil, dass sie beliebige Veränderungen am Werkzeug erlauben und aufgrund des verfügbaren Quellcodes die detaillierte Implementierung und damit auch alle Details über das verwendete Modell bekannt sind. Im Vergleich zu kommerziellen Werkzeugen bieten diese Werkzeuge nur einen eingeschränkten Bedienkomfort. Der Anwenderkreis dieser Werkzeuge ist im Vergleich zu den kommerziellen Werkzeugen klein, wobei die Verifikation des Simulationsmodells, d.h. die programmtechnische Umsetzung des Modellkonzepts in das Simulationsmodell eher bei einem großen Anwenderkreis sichergestellt ist (vgl. Abschnitt 4.2).

Eine Auswahl unter den kommerziellen Simulationswerkzeugen wäre anhand der verwendeten Modellansätze möglich. Die Darstellung des Ansatzes I der Kalibrierung und Validierung in Unterabschnitt 5.2.1 (siehe auch [Har07]) hat aber gezeigt, dass in den betrachteten Arbeiten kein Modell der Fahrzeugfolge als das beste Modell identifiziert werden konnte. Lediglich die Arbeit [LP04] identifiziert das Gipps-Modell als bestes Modell zur Beschreibung des menschlichen Fahrzeugfolgeverhaltens und daher als bestes Modell zur Untersuchung von Kollisionswarn- und Kollisionsvermeidungssystemen. Im Rahmen der Arbeit wurde sich für das kommerzielle Verkehrssimulationswerkzeug AIMSUN (siehe Unterabschnitt 4.5.1) entschieden, das auf dem Fahrzeugfolgemodell von Gipps basiert und alle im Werkzeug verwendeten Modelle und deren Implementierung am ausführlichsten im Vergleich zu anderen kommerziellen Verkehrssimulationswerkzeugen in den Handbüchern beschreibt. Abschnitt 8.1 stellt in Ergänzung zu Abschnitt 4.5 das Simulationswerkzeug AIMSUN und insbesondere die verwendeten Modellparameter vor. Die vorgenommene Abbildung der Strecke und des Verkehrsaufkommens wird in Abschnitt 8.2 beschrieben. AIMSUN bietet über ein API die Möglichkeit nahezu beliebige mikroskopische und makroskopische Messdaten aus der Simulation zu extrahieren (siehe Abschnitt 8.3).

8.1 Simulationswerkzeug AIMSUN

Einige Eigenschaften des Simulationswerkzeugs AIMSUN wurden bereits im Abschnitt 4.5 beim Vergleich mehrerer Simulationswerkzeuge vorgestellt. Dieser Abschnitt soll die für die folgenden Betrachtungen notwendigen Kenntnisse vertiefen.

Das Simulationswerkzeug bietet insgesamt die Möglichkeit knapp 80 Parameter einzustellen [Aim09b]. Dabei beeinflussen allerdings nicht alle einstellbaren Parameter das Fahrverhalten der Fahrzeuge. Hierzu gehören z. B. die Fahrzeugbreite, die lediglich für die grafische Darstellung verwendet wird, oder die mehr als zehn Parameter, die für die Bestimmung von Verbrauch und Emissionen benötigt werden.

Abbildung 8.1 zeigt die im Fahrzeugfolgemodell von AIMSUN verwendeten Parameter, wie sie im Benutzerhandbuch [Aim09b] spezifiziert sind. Die Parameter entsprechen

weitestgehend den Parametern, die Gipps 1981 benannt hat. Die Parameter sind v_{max} für die Wunschgeschwindigkeit (entspricht V in der Originalgleichung), a für die maximale Wunschbeschleunigung des Fahrers von Fahrzeug n, d für die „normal deceleration" (entspricht der maximalen Wunschverzögerung b in der Originalgleichung), die effektive Fahrzeuglänge s, die sich aus der Summe von Fahrzeuglänge und minimalen Abstand bei Stillstand (minimum distance between vehicles) berechnet, die Reaktionszeit T (entspricht τ in der Originalgleichung) sowie die durch den Fahrer angenommene maximale Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs $d(n-1)$ (entspricht $\hat{b}$ in der Originalgleichung). Hinzugekommen in AIMSUN ist die „maximum deceleration". Zum Verständnis dieser Größe wird die Gleichung (4.6) des Gipps-Modells nochmals aufgeführt:

$$v_n(t+\tau) = min\left\{v_n(t) + 2.5a_n\tau\left(1-\frac{v_n(t)}{V_n}\right)\sqrt{(0.025+\frac{v_n(t)}{V_n})}\,,\right.$$

$$\left. b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n\left(2\left[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)\right] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right)}\right\} \tag{8.1}$$

In der Gleichung (8.1) wird mithilfe der Parameterwerte von a, V, s, b, $\hat{b}$ und τ eine Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Hieraus lässt sich über die zeitliche Ableitung die Fahrzeugbeschleunigung berechnen. Diese Fahrzeugbeschleunigung kann dabei sowohl größer als auch kleiner als die „normal deceleration" sein. Ergibt sich nach Gleichung (8.1) eine Geschwindigkeit, aus der eine Fahrzeugbeschleunigung resultiert, die kleiner als die „maximum deceleration" ist, wird diese Verzögerung durch die „maximum deceleration" nach unten hin begrenzt.

Tabelle 8.1 zeigt die Standardparameter, die in AIMSUN mit einer gestutzten Normalverteilung angenommen werden. Die von der Veröffentlichung von Gipps abweichende Benennung der Parameter ist ebenfalls in der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 8.1: Standardparameterwerte für Fahrzeuge der Klasse „car" im Simulationswerkzeug AIMSUN und Benennung der Parameter in Veröffentlichung von Gipps

Parameter AIMSUN	**Parameter Gipps**	μ	σ	**Min.**	**Max.**
a $[m/s^2]$	a $[m/s^2]$	3	0,2	2,6	3,4
d $[m/s^2]$	-b $[m/s^2]$	4	0,25	3,5	4,5
v_{max} [km/h]	V $[m/s]$	110	10	80	150
vehicle length [m]	s [m]	4	0,5	3,4	4,6
min. distance [m]		1	0,3	0,5	1,5
maximum deceleration $[m/s^2]$	-	6	0,5	5	7

Alle weiteren in der Abbildung 8.1 dargestellten Parameter beeinflussen die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers. In Ergänzung zu den bislang in der Arbeit genannten globalen Parametern gibt es auch lokale Parameter, die nur für einen bestimmten Streckenabschnitt gelten. Die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers kann durch den lokalen Parameter einer Geschwindigkeitsbegrenzung eines Streckenabschnitts verringert werden. Durch die Multiplikation des Wertes der Geschwindigkeitsbegrenzung mit einem fahrerspezifischen „speed acceptance"-Faktor kann die resultierende Wunschgeschwindigkeit sowohl niedriger als auch höher als die vorgegebene Geschwindigkeitsbegrenzung sein.

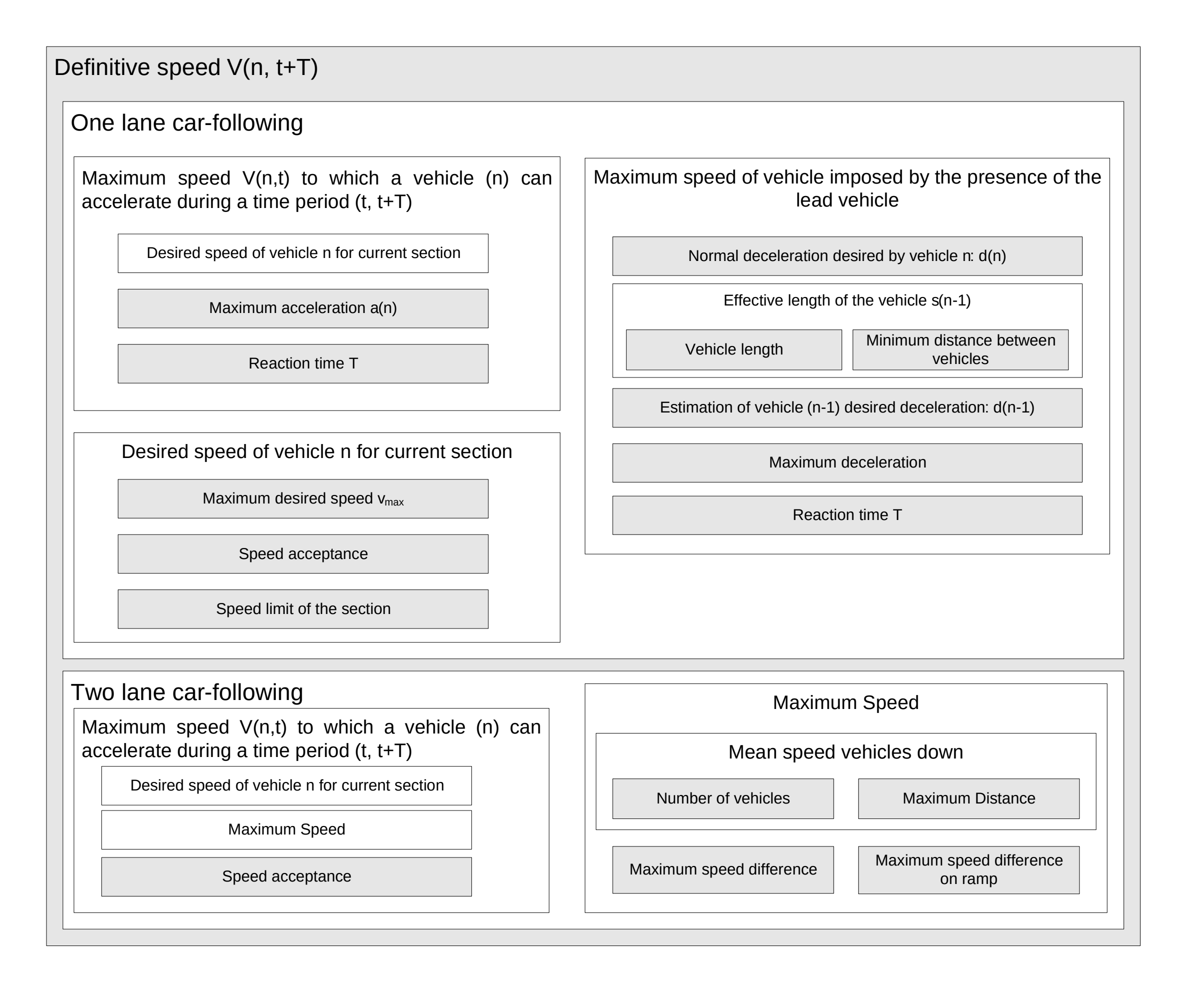


Abbildung 8.1: Parameter des Fahrzeugfolgemodells in AIMSUN

Bei Anwendung des „2-lane car following models“ wird bei der Bestimmung der Wunschgeschwindigkeit auch die Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf den Nachbarfahrstreifen berücksichtigt. Hierzu werden maximal „number of vehicles“ vorausfahrende Fahrzeuge, die maximal „maximum distance“ entfernt sind, betrachtet. Die eigene Wunschgeschwindigkeit darf maximal dem Mittelwert der Fahrzeuggeschwindigkeiten der zu betrachtenden Fahrzeuge plus „maximum speed difference“ entsprechen. Ist der nebenliegende Fahrstreifen eine Einfahrt, wird auf den Mittelwert anstelle von „maximum speed difference“ der Wert von „maximum speed difference on ramp“ addiert.

Zur Durchführung der Simulationen werden in AIMSUN „Experiments“ definiert, die mehrere „Replikations“ enthalten können. Für jede „Replikation“ kann eine Simulation durchgeführt werden. Das Unterscheidungsmerkmal der Replikationen ist der Wert der sogenannten „random seed“. Diese Zahl bestimmt den „Zufall“ in der Simulation, z. B. zur Bestimmung der Parameter der Fahrzeuge aus einer vorgegebenen Verteilung. Mit einem vorgegebenen Wert einer „random seed“ kann eine Simulation reproduzierbar wiederholt werden. Für ein aussagekräftiges Simulationsergebnis sind mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Werten für die „random seed“ durchzuführen, deren minimale Anzahl berechnet werden kann [HSS92].

8.2 Abbildung der Strecke und des Verkehrsaufkommens

Im Simulationswerkzeug AIMSUN wurde der in Abbildung 7.9 dargestellte Streckenabschnitt der Autobahn A2 von Hannover-Langenhagen bis Lehrte-Ost Fahrtrichtung Berlin modelliert. Neben der Streckenführung wurde auch die Lage der vorhandenen Messquerschnitte in AIMSUN hinterlegt, um die Messdaten mit dem API des Werkzeugs erheben zu können.

Die Ausfahrt Hannover-Lahe ist vom Typ A 2 der RAL-K-2 [FIH06], deren Abbildung nicht wirklichkeitsgetreu vorgenommen werden konnte. Abbildung 8.2 zeigt die gegebene Streckenführung und deren Umsetzung im Simulationswerkzeug. Die Ausfahrt Hannover-Lahe bietet die Möglichkeit, direkt vom Hauptfahrstreifen auf die Ausfahrt zu gelangen, sodass insgesamt auf zwei Fahrstreifen abgefahren werden kann. In AIMSUN gibt es nicht die Möglichkeit diese Streckenführung nachzubilden. Dies erforderte, in AIMSUN eine von der Realität abweichende Modellierung vorzunehmen, was eigentlich der Zielsetzung des vorgestellten Simulationskonzepts widerspricht. Aufgrund der großen Anzahl an ausfahrenden Fahrzeugen an dieser Ausfahrt auf den Messeschnellweg wurde sich entschieden, den Abbiegefahrstreifen und den Hauptfahrstreifen für die Fahrzeuge Richtung Messeschnellweg zu nutzen und die Überholfahrstreifen 1 und 2 für die in Richtung Braunschweig weiterfahrenden Fahrzeuge. Mit dieser Modellierung ist es den Fahrzeugen nicht möglich, auf dem Hauptfahrstreifen Richtung Braunschweig weiter zu fahren.

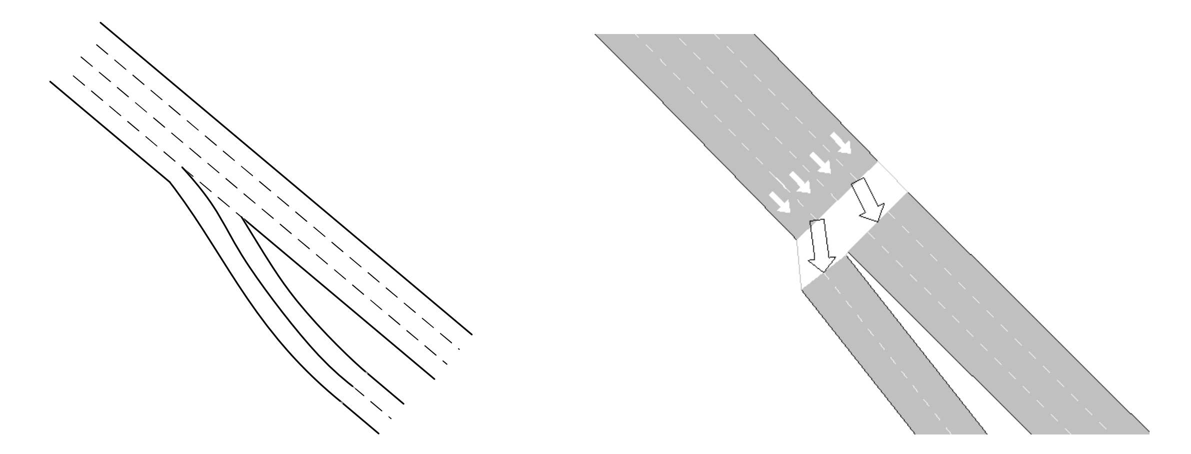


Abbildung 8.2: Vorhandene Streckenführung der Ausfahrt Hannover-Lahe (links) und deren Umsetzung in AIMSUN (rechts)

Da für den Streckenabschnitt der Autobahn A2 von Veltheim bis Lauenau Fahrtrichtung Berlin frühzeitig während der Arbeit Messdaten der Verkehrsrechnerzentrale vorlagen, wurde dieser Streckenabschnitt ebenfalls in der Simulation nachgebildet und die dort vorhandene Sensorik an sechs Messquerschnitten vorgesehen. Die beschriebene Auswertung in Abschnitt 10.5 wurde auf diesem Streckenabschnitt in der Simulation durchgeführt.

AIMSUN bietet mit einer speziellen Schnittstelle (AIMSUN API) die Möglichkeit vor, während und nach der Simulation auf die Einstellungen und den Ablauf der Simulation zuzugreifen. Abbildung 8.3 zeigt die grundsätzliche Struktur von AIMSUN und des API.

Zur Abbildung des Verkehrsaufkommens im Simulationswerkzeug bietet AIMSUN die Möglichkeit über das API vorhandene Messdaten einzulesen und darauf basierend die Fahr-

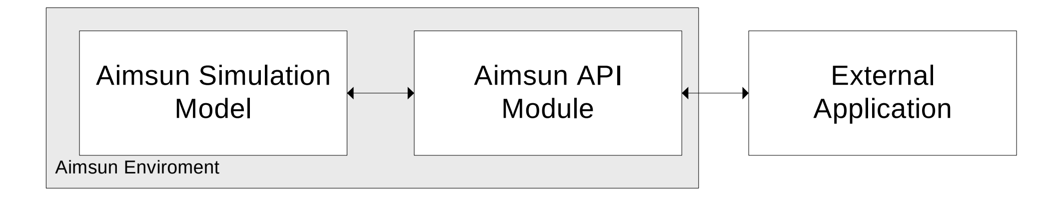


Abbildung 8.3: Struktur von AIMSUN und AIMSUN API (nach [Aim09a])

zeuge in der Simulation zu generieren. Da die Quelle-Ziel-Beziehung der Fahrzeuge nicht bekannt war, verblieb die Möglichkeit, die ausfahrenden Fahrzeuge über Abbiegeanteile in der Simulation zu definieren. Bei Umsetzung des vollständigen Messkonzepts könnten die erhobenen empirischen Messdaten eingelesen werden, um die einfahrenden Fahrzeuge am Beginn einer Strecke und an den Einfahrten zu generieren sowie die Abbiegeanteile an den Ausfahrten zu bestimmen. Da in der vorliegenden Arbeit die Anzahl der ausfahrenden und einfahrenden Fahrzeuge auf die Autobahn nicht bekannt war, sondern nur die Verkehrsstärke vor einer Ausfahrt und nach der nächsten Einfahrt, mussten für die Simulation Abbiegeanteile geschätzt werden, um damit die ausfahrenden und einfahrenden Fahrzeuge zu bestimmen. Diese manuell ermittelte Fahrzeuganzahl wurde anschließend direkt in der Simulation als „Traffic Demand“ hinterlegt, sodass die API für die Generierung des Verkehrsaufkommens nicht verwendet wurde.

8.3 Messdatenerhebung

Im Rahmen der Arbeit wurde das API für zwei Erhebungen von Messdaten verwendet. Zum einen für die Speicherung der Messdaten der Messquerschnitte für die Untersuchung der Verkehrsstärke, der mittleren lokalen Geschwindigkeit und der Fahrstreifenaufteilung in Abschnitt 10.2 und Abschnitt 10.3 sowie für die Untersuchung des Abstandsverhaltens in Abschnitt 10.5.

AIMSUN bietet die Möglichkeit, die Messdaten der Messquerschnitte direkt in einer Datenbank abzulegen. Von dieser Möglichkeit wurde nicht Gebrauch gemacht, sondern es wurde das API des Simulationswerkzeugs genutzt. Dieses hat den Vorteil, dass das auszugebende Datenformat selbst definiert werden kann. Es wurde eine Umsetzung in C++ realisiert, die die Messdaten der Messquerschnitte in genau dem Format ablegt, in dem bereits die empirischen Messdaten von der Verkehrsrechnerzentrale vorlagen. Dieses bot für die nachfolgende Auswertung in Matlab den Vorteil, dass weitestgehend keine Unterscheidung zwischen empirischen und simulierten Datensätzen vorgenommen werden musste.

Zur Untersuchung des Abstandsverhaltens war die Verwendung des API zwingend notwendig, da diese Messdaten nicht über die Standardfunktionen des Programms erhältlich sind. Einzelne Fahrzeuge der Simulation wurden dabei mit einer virtuellen Sensorik ausgestattet, die die reale Sensorik zur Erfassung des nachfolgenden Fahrzeugs nachbilden soll, sodass in der Simulation eine Vielzahl von simulierten Fahrzeugen beobachtet werden konnte. Die vom API bereitgestellten Funktionen lieferten leider nicht direkt das nachfolgende Fahrzeug, sodass dieses in jedem Simulationsschritt anhand der Kenntnis des Fahrstreifens und der Positionsangabe der Fahrzeuge auf dem befahrenden Streckenabschnitt gesucht werden musste. Da durch diese Suche die Performance der Simulation eingeschränkt

wird, wurde im Rahmen der Arbeit stets nur ein Versuchsfahrzeug gleichzeitig simuliert. Sobald das Versuchsfahrzeug den Streckenabschnitt verlassen hatte, wurde ein neues Versuchsfahrzeug am Beginn der Strecke generiert. Die Messdaten wurden mit der gleichen Struktur abgelegt, wie sie auch für die Realdaten gewählt wurde. Als Unterschied zwischen den Messdaten verblieb, dass die Realdaten alle 10 ms und die Simulationsdaten alle 700 ms entsprechend der Simulationsschrittweite aufgezeichnet wurden. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, für die Auswertung in Matlab für beide Datensätze beinahe identische Auswertealgorithmen zu verwenden.

9 Mikroskopische Kalibrierung

In Kapitel 6 wurde aufgezeigt, dass sowohl das Fahrzeugfolge- als auch das Fahrstreifenwechselverhalten auf mikroskopischer Ebene kalibriert und validiert werden muss.

Der klassische Ansatz zur Kalibrierung des Fahrzeugfolgemodells verwendet einen Optimierungsalgorithmus, um die Parameter des Modells zu identifizieren, die ein bestimmtes Fehlermaß, welches die Abweichung zwischen den Werten einer empirischen Kenngröße und den Werten der in der Simulation bestimmten Kenngröße beschreibt, minimieren. In diesem Kapitel wird zuerst eine Übersicht über mögliche Fehlermaße (Abschnitt 9.1) und Optimierungsverfahren (Abschnitt 9.2) gegeben und für die Kalibrierung des in AIMSUN verwendeten Gipps-Fahrzeugfolgemodells ein Fehlermaß und ein Optimierungsverfahren ausgewählt. Zum Nachweis der Eignung dieser Auswahl werden anschließend die Parameter für eine synthetisch erzeugte Folgefahrt bestimmt (Abschnitt 9.3). Es folgt die Parameteridentifikation für die empirisch beobachteten Folgefahrten sowohl für die Folgefahrten des Versuchsfahrzeugs als auch für die Folgefahrten der dem Versuchsfahrzeug nachfolgenden Fahrzeuge (Abschnitt 9.4). Ein Parameter des Gipps-Fahrzeugfolgemodells ist die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers. Zur Bestimmung dieses Parameters werden vom Institut für Fahrzeugtechnik zur Verfügung gestellte Messdaten der gefahrenen Geschwindigkeiten von mehreren Versuchsfahrern auf der Strecke Braunschweig-Hannover betrachtet (Abschnitt 9.5).

Abschließend erfolgt eine Betrachtung der Kalibrierung des Fahrstreifenwechselverhaltens auf mikroskopischer Ebene (Abschnitt 9.6).

9.1 Fehlermaße

Für die Kalibrierung und Validierung eines Simulationsmodells ist es notwendig, die Übereinstimmung von Simulation und Empirie zu bewerten. Hierzu ist es notwendig, eine Funktion zu bestimmen, die die Abweichung zwischen den Werten der simulierten und empirischen Kenngrößen beschreibt. Diese Funktion wird als Fehlermaß bezeichnet. In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über häufig verwendete Fehlermaße gegeben [CP10], [HL08]. Tabelle 9.1 zeigt eine Zusammenfassung der vorgestellten Fehlermaße.

Die nachfolgend genannten prozentualen Fehler werden in der berücksichtigten englischsprachigen Literatur mit „percent error", „percentage error" oder auch „normalized error" bezeichnet. Da die verwendeten Kurzzeichen für das Fehlermaß auf der englischen Benennung beruhen, wird beim prozentualen Fehler sowohl „P" als auch „N" im Kurzzeichen benutzt. In dieser Arbeit wird einheitlich „percent error" und „P" verwendet.

Zur Berechnung der Fehlermaße können unterschiedliche Kenngrößen (Measure of Effectiveness (MOE) oder auch Measure of Performance (MOP)) verwendet werden. Die auf mikroskopischer Ebene bei der Betrachtung des Fahrzeugfolgeverhaltens am häufigsten verwendeten Größen sind die Fahrzeuggeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs und der Fahrzeugabstand sowie auf makroskopischer Ebene die Verkehrsstärke und die mittlere

Tabelle 9.1: Fehlermaße zur Bewertung der Übereinstimmung von Empirie und Simulation

Benennung	**Formel**
Mean Error (ME)	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)$
Mean Percent Error (MPE)	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i-y_i}{y_i}\right)$
Mean Absolute Error (MAE)	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert x_i - y_i\rvert$
Mean Absolute Percent Error (MAPE)	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\lvert\frac{x_i-y_i}{y_i}\right\rvert$
Fehlermaß nach Brockfeld und Ranjitkar (e)	$\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert x_i-y_i\rvert}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert y_i\rvert}$
Root Mean Squared Error (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}$
Root Mean Squared Percent Error (RMSPE)	$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i-y_i}{y_i}\right)^2}$
Korrelationskoeffizient (r)	$\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})}{\sigma_x\sigma_y}$
Theil's Inequality Coefficient (U)	$\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2}+\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2}}$

mit
x_i simulierter Wert der Kenngröße
y_i empirischer Wert der Kenngröße
n Anzahl der berücksichtigen Werte

lokale Geschwindigkeit.

9.1.1 Mittlerer (prozentualer) Fehler

Mit dem mittleren Fehler (Mean Error (ME)) lässt sich eine systematische Über- oder Unterschätzung identifizieren [Tra06].

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i) \tag{9.1}$$

Wird der Fehler auf den empirischen Wert normiert, erhält man den mittleren prozentualen Fehler (Mean Percent Error (MPE)). Dadurch werden Abweichungen bei kleinen empirischen Messwerten stärker gewichtet als dieselbe absolute Abweichung bei großen empirischen Messwerten.

$$MPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - y_i}{y_i}\right) \tag{9.2}$$

Zur Kalibrierung sind diese Fehlermaße ungeeignet, da kleine Werte von ME und MPE keine gute Übereinstimmung garantieren, sondern nur die Aussage erlauben, dass keine systematische Über- oder Unterschätzung vorliegt.

9.1.2 Mittlerer absoluter (prozentualer) Fehler

Der mittlere absolute Fehler (Mean Absolute Error (MAE)) erlaubt eine Aussage zum ungewichteten Gesamtfehler.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i| \tag{9.3}$$

Wird der Fehler auf den empirischen Wert normiert, erhält man den mittleren absoluten prozentualen Fehler (Mean Absolute Percent Error (MAPE)).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{x_i - y_i}{y_i} \right| \tag{9.4}$$

9.1.3 Prozentualer Fehler nach Brockfeld und Ranjitkar

In den Arbeiten von Brockfeld [BKW04a] und Ranjitkar [RNA04],[RNK05] (siehe Unterabschnitt 5.2.1) wird ein prozentualer Fehler verwendet, der nicht mit dem mittleren absoluten prozentualen Fehler verwechselt werden darf.

$$e = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^{n} |y_i|} \tag{9.5}$$

Während beim mittleren absoluten prozentualen Fehler für jeden Messzeitpunkt i die Abweichung auf den gemessenen Wert des Zeitpunkts i bezogen wird, beschreibt Gleichung (9.5) das Verhältnis vom mittleren absoluten Fehler zum arithmetischen Mittelwert der gemessenen Werte.

Ist die Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert und dem gemessenen Wert zu einem Zeitpunkt i groß, hat dies zur Folge, dass diese Abweichung im oben beschriebenen Fehlermaß deutlich geringer (falls arithmetischer Mittelwert > gemessener Wert zum betrachteten Zeitpunkt i) bzw. stärker (falls arithmetischer Mittelwert < gemessener Wert zum betrachteten Zeitpunkt i) eingeht im Vergleich zur Gewichtung bei der Berechnung des mittleren absoluten prozentualen Fehlers.

Abbildung 9.1 zeigt den Verlauf von empirisch gemessenem Abstand und simulierten Abstand zwischen zwei Fahrzeugen für eine beispielhafte Folgefahrt. Der prozentuale Fehler nach dem Fehlermaß von Brockfeld und Ranjitkar beträgt für die Abstandswerte dieser Folgefahrt 17,0 %, der mittlere absolute prozentuale Fehler hingegen ist deutlich größer und beträgt 43,5 %. Ursache hierfür ist, dass z. B. für einzelne Zeitpunkte der empirische Wert des Abstandes ca. 0,6 m und der Wert in der Simulation ca. 3 m beträgt, was bei der Berechnung des mittleren prozentualen Fehlers für diese Zeitpunkte einem prozentualen Fehler von 400 % entspricht. Beim Fehlermaß nach Brockfeld und Ranjitkar hingegen wird der simulierte Wert stets auf den Mittelwert des empirischen Werts bezogen, der bei 7,4 m liegt. Für die Zeitwerte mit einem empirischen Wert des Abstandes von ca. 0,6 m und einem simulierten Abstand von ca. 3 m ergibt sich damit lediglich ein prozentualer Fehler von ca.

32 %. Noch größer wird der Unterschied bei Verwendung des mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (RMSPE) (vgl. Unterabschnitt 9.1.4). Dieser beträgt für die betrachtete Folgefahrt 95,3 %.

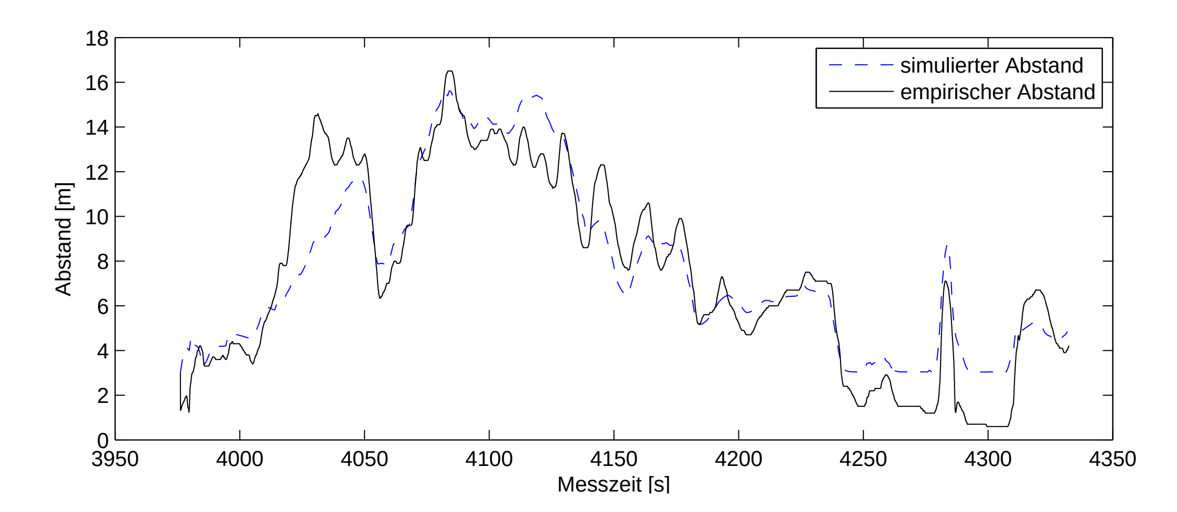


Abbildung 9.1: Gemessener und simulierter Abstandsverlauf für eine Folgefahrt

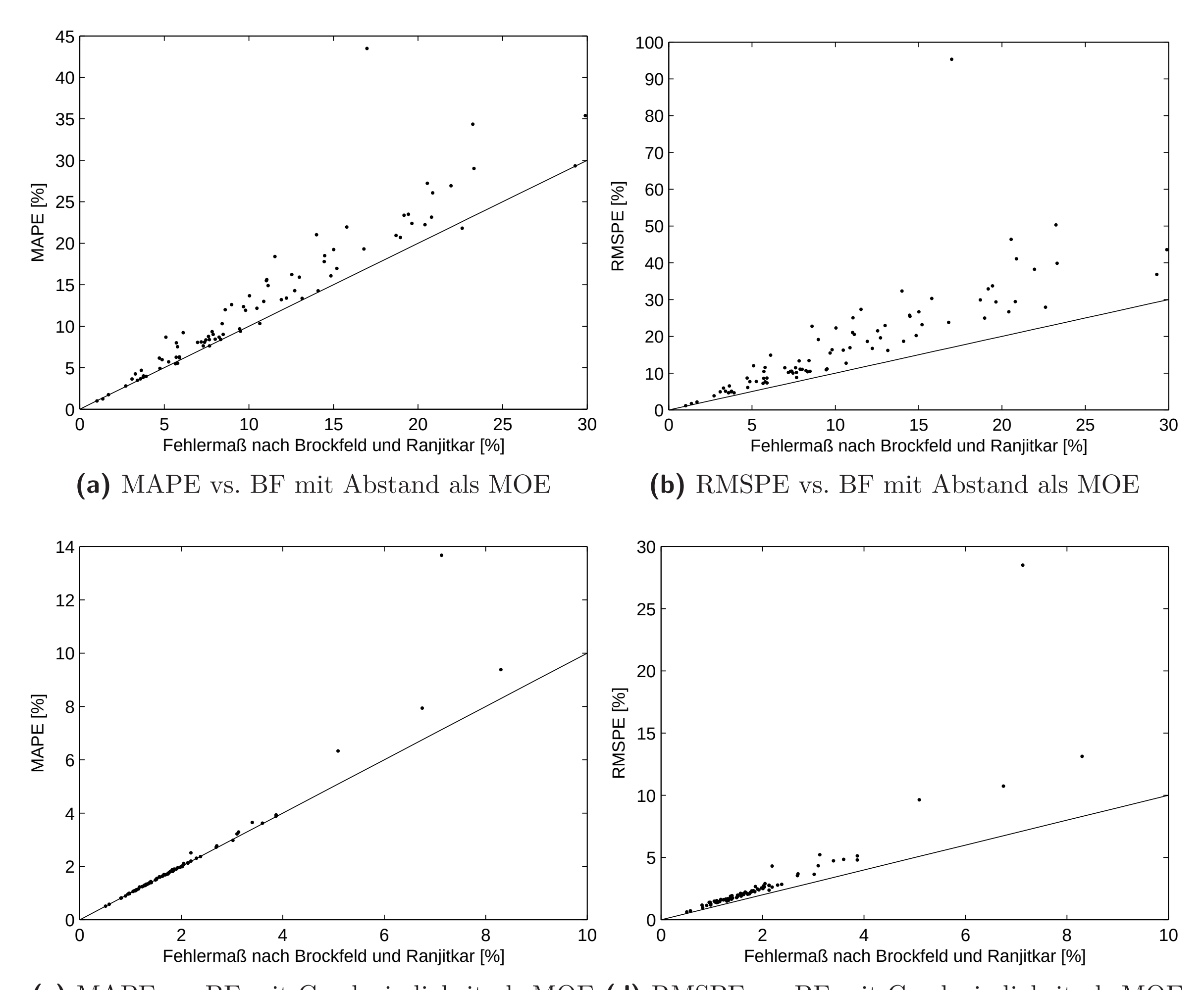
Ergänzend zum Vergleich dieser einzelnen Folgefahrt wurden im Rahmen der Arbeit die Fehlermaße MAPE, RMSPE sowie das Fehlermaß nach Brockfeld und Ranjitkar (BF) für 85 Folgefahrten der dem Versuchsfahrzeug nachfolgenden Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 9.4) miteinander verglichen.

Die Abbildung 9.2 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs. Um den grafischen Vergleich zu erleichtern, enthält jeder Graf eine Vergleichsgerade, die die Lage identischer Fehlerwerte angibt. Für die Berechnung der Fehlerwerte wurde in Abbildung 9.2a und Abbildung 9.2b der Abstand als Measure of Effectiveness (MOE) verwendet, in Abbildung 9.2c und Abbildung 9.2d die Geschwindigkeit.

Es ist in den Abbildungen zu erkennen, dass die Fehlerwerte für MAPE, RMSPE und dem Fehlermaß nach Brockfeld und Ranjitkar für die Geschwindigkeit als MOE insgesamt betrachtet deutlich kleiner sind im Vergleich zum Abstand als MOE (vgl. Ergebnisse des Department of Transportation Engineering der Universität Neapel (Italien) in Unterabschnitt 5.2.1). Der Vergleich zwischen MAPE und BF sowie zwischen RMSPE und BF zeigt, dass das Fehlermaß BF für fast alle Folgefahrten die niedrigeren Werte liefert.

Daran zeigt sich die Notwendigkeit der detaillierten Betrachtung des verwendeten Fehlermaßes (inkl. der verwendeten Kenngröße) bei Aussagen zum „prozentualen Fehler“ eines Modells und beim Vergleich von Forschungsergebnissen (siehe Unterabschnitt 5.2.1).

Ein Vorteil dieses Fehlermaßes ist, dass beim mittleren absoluten prozentualen Fehler und der Verwendung der Fahrzeuggeschwindigkeit als Kenngröße eine Division durch Null möglich ist und dies für dieses Fehlermaß nicht zu erwarten ist. So sind im Anhang D die Ergebnisse der Berechnung aller hier genannten Fehlermaße für alle betrachteten Folgefahrten aufgelistet, wobei für den mittleren absoluten prozentualen Fehler in einigen Fällen der Wert „Inf“ angegeben ist, da das Fehlermaß aufgrund einer Division durch null nicht berechnet werden konnte.



(a) MAPE vs. BF mit Abstand als MOE **(b)** RMSPE vs. BF mit Abstand als MOE

(c) MAPE vs. BF mit Geschwindigkeit als MOE **(d)** RMSPE vs. BF mit Geschwindigkeit als MOE

Abbildung 9.2: Vergleich der prozentualen Fehlerwerte

9.1.4 Mittlerer quadratischer (prozentualer) Fehler

Ein häufig verwendetes Fehlermaß ist der mittlere quadratische prozentuale Fehler (Root Mean Squared Percent Error (RMSPE)). Ohne Normierung ist dies der mittlere quadratische Fehler (Root Mean Squared Error (RMSE)) [Tra06], [HMK03].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{9.6}$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i - y_i}{y_i}\right)^2} \tag{9.7}$$

Durch die quadratische Gewichtung der Abweichungen im RMS(P)E werden Ausreißer mit einem überproportionalen Gewicht berücksichtigt. Wie bereits beim mittleren prozentualen Fehler werden beim RMSPE Abweichungen bei kleinen empirischen Messwerten stärker gewichtet als dieselbe absolute Abweichung bei großen empirischen Messwerten.

9.1.5 Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient gibt den linearen Zusammenhang von zwei Merkmalen an und ist wie folgt definiert [HMK03].

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sigma_x \sigma_y} \tag{9.8}$$

mit

$\overline{x}$ arithmetisches Mittel der simulierten Werte der Kenngröße
$\overline{y}$ arithmetisches Mittel der empirischen Werte der Kenngröße
σ_x Standardabweichung der simulierten Werte der Kenngröße
σ_y Standardabweichung der empirischen Werte der Kenngröße

Der Korrelationskoeffizient nimmt Werte zwischen -1 und +1 an, wobei +1 einen vollständigen positiven linearen Zusammenhang bedeutet. Werte um 0 bedeuten, dass überhaupt kein linearer Zusammenhang zwischen den Merkmalen besteht. -1 bedeutet einen vollständigen negativen linearen Zusammenhang. Durch die Notwendigkeit, den arithmetischen Mittelwert und die Standardabweichung zu bestimmen, erhöht sich der Rechenaufwand bei umfangreichen Untersuchungen [HMK03].

9.1.6 Theil's Inequality Coefficient

Der Theil's Inequality Coefficient ist wie folgt definiert [Ueb10], [Irz09], [Tra06], [HMK03].

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2}} \tag{9.9}$$

U kann Werte zwischen 0 und +1 annehmen, wobei 0 völlige Gleichheit und +1 völlige Ungleichheit zwischen den simulierten und empirischen Werten bedeutet.

Der Zähler entspricht dem Root Mean Squared Error (RMSE). Der Radikand kann in drei Teile zerlegt werden, sodass man drei unterschiedliche Koeffizienten erhält, die Aufschluss über den gemachten Fehler geben.

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2 = (\overline{x} - \overline{y})^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2(1-r)\sigma_x\sigma_y \tag{9.10}$$

$$MSE = (\overline{x} - \overline{y})^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2(1-r)\sigma_x\sigma_y \tag{9.11}$$

$$1 = \frac{(\overline{x} - \overline{y})^2}{MSE} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{MSE} + \frac{2(1-r)\sigma_x\sigma_y}{MSE} \tag{9.12}$$

$$1 = U_m + U_s + U_c \tag{9.13}$$

mit

$$U_m = \frac{(\overline{x} - \overline{y})^2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{9.14}$$

$$U_s = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{9.15}$$

$$U_c = \frac{2(1-r)\,\sigma_x\sigma_y}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \tag{9.16}$$

U_m (bias proportion) gibt den Anteil des Fehlers an, der aufgrund unterschiedlicher Mittelwerte entsteht. Somit gibt er Aufschluss, ob eine systematische Über- bzw. Unterschätzung der Simulation vorliegt. U_m sollte null sein.

U_s (variance proportion) liefert eine Information über die unterschiedliche Varianz, den systematischen Unterschied in der Variation der simulierten und empirischen Werte. U_s sollte null sein.

U_c (covariance proportion) beschreibt das Fehlen eines linearen Zusammenhangs und ist eine Bewertungsgröße für den unsystematischen Fehler. U_c sollte 1 sein [Tra06].

Aufgrund der zusätzlichen drei Informationen neben dem Theil's Inequality Coefficient kann während der Optimierung überprüft werden, welcher Fehler am größten ist und sich somit am meisten rentiert zu minimieren. Dieses Verfahren lohnt sich nur, wenn bekannt ist, welche Parameter Einfluss auf welche Werte (Mittelwert, Varianz, etc.) haben. Theil's U ist genauer und empfindlicher als der Korrelationskoeffizient r und der RMSPE [HMK03].

9.1.7 Combined or Mixed Error Measures

In der Literatur werden auch Kombinationen der oben genannten Fehlermaße angewendet [Kes08]. Neben der Kombinierung mehrere Fehlermaße kann auch ein Fehlermaß zur gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer Kenngrößen (MOP/MOE) erweitert werden [OH08]. Der Bedarf zur Berücksichtigung mehrerer Kenngrößen zeigt sich z.B. in [PS05]. Die Autoren untersuchen die Auswirkung der verwendeten Kenngröße zur Kalibrierung auf den erhaltenen Fehler. Für das Gipps-Modell ergibt sich bei Kalibrierung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit ein Fehler (RMSPE) für die Abstände von 34 %. Wird der Abstand hingegen zur Kalibrierung verwendet, reduziert sich der Fehler für die Abstände auf 16 %.

In [OH08] wird die Auswirkung unterschiedlicher Fehlermaße und unterschiedlicher verwendeter Kenngrößen (MOE/MOP) untersucht (siehe Unterabschnitt 5.2.1). In ihrer Arbeit verwenden die Autoren u.a. Theil's U mit gleichzeitiger Betrachtung von Geschwindigkeit und Abstand als Kenngrößen. Für den Fall, dass nicht bekannt ist, für welche Kenngröße die beste Kalibrierung erreicht werden kann, empfehlen sie ein derartiges kombiniertes Fehlermaß zu verwenden (siehe Gleichung (9.17)).

$$U_{combined} = \lambda_1 \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i^{sim} - \Delta x_i^{emp})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i^{sim})^2} + \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i^{emp})^2}} + \lambda_2 \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_i^{sim} - v_i^{emp})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_i^{sim})^2} + \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_i^{emp})^2}} \tag{9.17}$$

mit

λ_1, λ_2	Gewichtungsfaktoren
Δx^{sim}	simulierter Fahrzeugabstand
Δx^{emp}	empirischer Fahrzeugabstand
v^{sim}	simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit
v^{emp}	empirische Fahrzeuggeschwindigkeit

Durch das in Gleichung (9.17) beschriebene Fehlermaß können die Kenngrößen Abstand und Fahrzeuggeschwindigkeit gleichzeitig bei der Kalibrierung berücksichtigt werden und über λ_1 und λ_2 zusätzlich eine Gewichtung vorgenommen werden.

9.1.8 Auswahl des Fehlermaßes

Im Rahmen der Arbeit wurde sich für die Verwendung der Gleichung (9.17) für die Kalibrierung des Gipps-Fahrzeugfolgemodells mit $\lambda_1 = 1$ und $\lambda_2 = 1$ entschieden. Der Wertebereich dieser kombinierten Größe von Theil's U liegt damit zwischen 0 und +2. Als besonderer Vorteil ist die Berücksichtigung sowohl des zeitlichen Verlaufs von Fahrzeugabstand als auch Fahrzeuggeschwindigkeit zu nennen. Die Entscheidung beruht damit auf der oben genannten Empfehlung der ausführlichen Untersuchung in [OH08]. Weiterer Vorteil ist, dass eine Division durch Null bei der Berechnung dieses Fehlermaßes nicht auftreten kann. Die einzige Ausnahme, bei der eine Division durch Null möglich wäre, ist die Betrachtung des dauerhaften Stillstands beider Fahrzeuge. Diese Ausnahme wird als nicht relevant für die Betrachtung des Fahrzeugfolgeverhaltens angesehen.

9.2 Optimierungsverfahren

Nachdem die zu untersuchenden Kenngrößen und ein Fehlermaß festgelegt wurden, muss ein geeignetes Optimierungsverfahren gefunden werden, das in der Lage ist, die Parameter des Simulationsmodells in der Form zu variieren, sodass ein Parametersatz identifiziert wird, bei dem das gewählte Fehlermaß einen möglichst niedrigen Wert annimmt. Das Optimierungsverfahren muss idealerweise in der Lage sein, gefundene lokale Optima wieder zu verlassen und außerdem reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. Ein Algorithmus, der sowohl nur ein lokales Optimum als auch bei jedem Durchlauf stark in der Güte schwankende Lösungen findet, ist für eine Kalibrierung nur eingeschränkt einsetzbar. Die folgenden Unterabschnitte geben eine Übersicht über die gängigen Optimierungsverfahren sowie deren Vor- und Nachteile.

9.2.1 Zufallsgesteuerte Optimierung (Raten)

Dieses Optimierungsverfahren ist das einfachste von allen Optimierungsverfahren. Es beruht darauf, zufällige Parameter zu wählen, mit diesen Parametern die Simulation durchzuführen und mit den Ergebnissen das gewählte Fehlermaß zu berechnen. Ist der Wert kleiner als der bisher gefundene kleinste Wert, wird sich dieser neue Wert gemerkt. Dieses Verfahren arbeitet solange, bis ein vorher festgelegtes Fehlermaß unterschritten wird.

Vorteile dieses Verfahrens sind die einfache programmtechnische Umsetzung und die Fähigkeit, gefundene lokale Minima wieder zu verlassen. Die Nachteile sind, dass die zufällige Suche sehr lange dauert und nicht bekannt ist, wie lange eine weitere Suche sinnvoll ist. Eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist mit dieser Methode nicht möglich. Aufgrund

dieser Nachteile wird dieses Verfahren für die Kalibrierung von Verkehrssimulationen nicht verwendet.

9.2.2 Trial und Error mit Sensitivitätsanalyse

Im Gegensatz zu den rechnergestützten automatisiert ablaufenden Optimierungsalgorithmen ist „Trial and Error mit Sensitivitätsanalyse“ ein Verfahren der manuellen Parametersuche durch einen erfahrenden Anwender. Die manuelle Suche nach einem geeigneten Parametersatz wäre nach der oben beschriebenen „Zufallsgesteuerten Optimierung“ ebenfalls möglich. Da diese Suche sehr zeitaufwendig ist, ist für dieses Vorgehen ein sehr erfahrender Anwender notwendig, der aufgrund seines Erfahrungswissens die Auswirkung der Veränderung eines Parameters auf die untersuchte Kenngröße und das untersuchte Fehlermaß abschätzen kann. Auch ohne erfahrenden Anwender ist ein systematisches Vorgehen mit einer vorherigen Sensitivitätsanalyse der Parameter des untersuchten Modells möglich. Dabei werden zum einen die Parameter identifiziert, die die größte Auswirkung auf das Fehlermaß haben, zum anderen wird die Richtung der Auswirkung analysiert. Nur die Parameter mit einer entsprechend großen Auswirkung werden anschließend bei der manuellen Einstellung der Parameter verwendet. Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist in [LVZC+09] beschrieben.

9.2.3 Gradientenverfahren (steilster Abstieg)

Das Gradientenverfahren beruht darauf, dass ausgehend von einem gewählten Anfangsparametersatz der nächste Schritt in die Richtung der größten Abnahme des Fehlermaßes erfolgt [Woh05], [Bou05], [Goo98]. Diese Richtung kann über die 1. Ableitung des Fehlermaßes (falls bestimmbar) ermittelt werden. Das Hooke-Jeves-Verfahren ist ein mögliches Gradientenverfahren. Bei diesem Verfahren wird die Richtung für den nächsten Schritt bestimmt, indem in jede Richtung getastet wird. Beim Tasten wird jeweils nur ein Parameter geändert und durch die größte Verbesserung wird die Richtung vorgegeben. Neben der Richtung ist auch die Schrittweite von Bedeutung. Bei einer festgewählten kleinen Schrittweite kann es bei einem Gradienten in nur eine Richtung passieren, dass sehr viele einzelne Schritte in eine Richtung gemacht werden müssen. Andererseits kann ein Optimum bei zu großer fester Schrittweite übersprungen werden, sodass die Schritte um das Optimum pendeln. Denkbar wäre eine adaptive Schrittweite, die sich an die Krümmung (2. Ableitung, falls bestimmbar) des Fehlermaßes anpasst. Im Hooke-Jeves-Verfahren wird dieses nicht genutzt.

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass man bei jedem Schritt eine Verbesserung des Fehlermaßes erhält, sodass in kurzer Zeit ein Optimum erreicht wird. Ein wesentlicher Nachteil ist, dass bei mehreren Parametern erst in viele Richtungen abgetastet werden muss, bis ein Schritt gemacht wird und dadurch der zuerst genannte Vorteil aufgehoben wird. Der größte Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass selten das globale Optimum, sondern meist in Abhängigkeit der Startwerte der Parameter unterschiedliche lokale Minima gefunden werden. Bei der Anwendung zur Kalibrierung von Verkehrssimulationen müsste die Optimierung mehrmals mit unterschiedlichen Startwerten durchgeführt werden, um das beste der lokalen Minima zu finden.

9.2.4 Evolutionäre Algorithmen

Bei der Anwendung von evolutionären Algorithmen wird eine bestimmte Anzahl μ von Parametersätzen zufällig erzeugt. Aus diesen werden dann mehrmals jeweils zwei zufällige Parametersätze gewählt, die jeweils einen Nachkommen generieren. Dabei erlaubt diese Auswahl, dass ein Parametersatz mehrmals zur Generierung von Nachkommen ausgewählt wird. Der Nachkomme ist eine Kombination aus den Parametern der Eltern. Einige Parameter können auch mutieren, das heißt, dass sich die Werte um eine bestimmte Schrittweite von denen der Eltern unterscheiden können. Nachdem auf diese Weise die nächste Generation entstanden ist, gibt es zwei weitere Vorgehensweisen. Ein Ansatz ist die „Plus-Strategie“, bei der die Eltern weiter leben und aus dem gesamten Umfang der Eltern und Nachkommen die λ besten ausgewählt werden, die dann die nächste Generation bilden. Hierbei gilt $\lambda < \mu$, sodass die „Bevölkerung“ immer kleiner wird und nur der beste Parameterwertesatz überlebt. Die andere Möglichkeit ist die „Komma-Strategie“. Hierbei sterben die Eltern, nachdem alle Nachkommen erzeugt wurden, und unter den Nachkommen werden die λ besten selektiert.

Variationen hiervon sehen vor, einen Nachkommen aus mehr als zwei Elternteilen zu generieren. Die Generierung der Parameter des Nachkommens erlaubt auch mehrere Möglichkeiten, wie die zufällige Übernahme eines Elternwertes oder eine Mittelwertbildung der Werte der Parameter der Eltern.

Der Vorteil des Algorithmus ist, dass er effektiver als die bisher vorgestellten Algorithmen arbeitet und in der Lage ist, ein lokales Optimum während der Suche wieder zu verlassen. Ein Nachteil dieses Verfahren ist die Komplexität und die häufige Bewertung von Parametersätzen. In jedem Schritt muss die gesamte „Bevölkerung“ bewertet und sortiert werden, damit die besten ausgewählt werden können [Goo98].

9.2.5 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen sind ähnlich wie die evolutionären Algorithmen aufgebaut. Anfangs wird eine Population von Parametersätzen generiert, die dann anhand eines Fehlermaßes bewertet werden.

Die nächste Generation wird durch zwei unterschiedliche Prozesse gebildet. Eine bestimmte Anzahl an Parametersätzen bildet Nachkommen durch Kreuzung. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit, an der Kreuzung teilzunehmen, von besseren Parametersätzen größer. Bei der Kreuzung werden zwei Nachkommen generiert. Der erste Nachkomme erhält die ersten m Parameter eines Elternteils und letzten $n - m$ Parameter des zweiten Elternteils (mit n=Anzahl der Parameter und $m \leq n$). Der zweite Nachkomme erhält die ersten m Parameter des zweiten Elternteils und letzten $n - m$ Parameter des ersten Elternteils. Nach der Kreuzung können einige Parameter noch wie beim evolutionären Algorithmus mutieren.

Die zweite Möglichkeit ist das Klonen, dabei wird ein identischer Klon eines Parametersatzes gebildet. Nach dem Klonen kann der Nachkomme unter gleichen Bedingungen wie die bei der Kreuzung mutieren. Die genaue Beschreibung, welche Parameterwertesätze in die kommende Generation übernommen werden, ist abhängig von der gewählten Implementierung. Unabhängig von der Implementierung pflanzen sich die besten Parameterwerte mit größerer Wahrscheinlichkeit als andere fort, sodass der Algorithmus nach mehreren Schritten ein Optimum ermittelt. Das beschriebene Konzept ist in Abbildung 9.3

dargestellt.

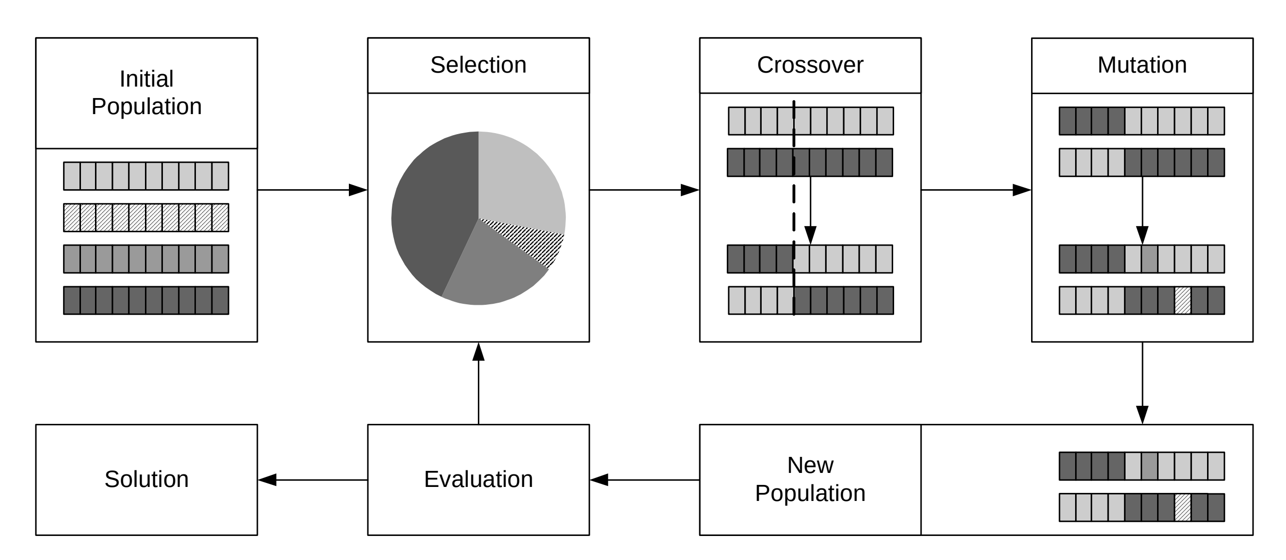


Abbildung 9.3: Konzept eines genetischen Algorithmus, nach [PW06]

Die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens sind dieselben wie die des evolutionären Algorithmus. Dennoch gibt es einige Unterschiede. Allgemein konvergieren evolutionäre Algorithmen schneller als genetische Algorithmen, mit der Gefahr in einem lokalen Optimum zu landen. Die genetischen Algorithmen legen mehr Wert auf die Kreuzung als auf die Mutation, sodass der Suchraum in größeren Sprüngen durchsucht wird, wodurch ein größerer Teil des Suchraumes erfasst wird. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit auf ein globales Optimum oder ein gutes lokales Optimum zu treffen [ZJD08], [Bou05], [Goo98].

Die genetischen Algorithmen gehören zu den am häufigsten verwendeten Optimierungsverfahren.

9.2.6 Gewähltes Optimierungsverfahren und zu optimierende Parameter

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kalibrierung des in AIMSUN verwendeten Fahrzeugfolgemodells nach Gipps mithilfe genetischer Algorithmen durchgeführt. Die Entscheidung für dieses Optimierungsverfahren fiel insbesondere aufgrund folgender Vorteile [ZJD08]:

- Es müssen keine Gradienteninformationen hinsichtlich der zu optimierenden Parameter vorhanden sein.
- Es wird mit mehreren Sätzen von Parameterwerten begonnen und damit ist die Wahrscheinlichkeit, in einem lokalen Optimum stehen zu bleiben, gering.
- Der Algorithmus konvergiert und es besteht die Möglichkeit, das globale Optimum zu finden.

Zur Umsetzung des Optimierungsverfahrens wurden die freien C++-Bibliotheken von GAlib [GAl10] verwendet. Wie bereits in Abschnitt 6.6 beschrieben, wurde für die Kalibrierung nicht das Simulationswerkzeug AIMSUN selbst benutzt, sondern es wurde das im Detail bekannte Fahrzeugfolgemodell für die Verwendung mit GAlib in C++ nachgebildet.

Für die Optimierung wurde eine Anfangspopulation von 40 zufälligen Parametersätzen generiert. Die Wahrscheinlichkeit für das Crossover wurde zu 0,6 festgesetzt, die Mutationswahrscheinlichkeit wurde zu 0,08 festgesetzt. Die Optimierung wurde stets für 10 000 Generationen durchgeführt.

Insgesamt besitzt das Fahrzeugfolgemodell von Gipps sechs zu bestimmende Parameter (siehe Unterabschnitt 4.3.2), die für eine Anpassung der simulierten Folgefahrt an die empirische Folgefahrt optimiert werden können. Zur besseren Übersicht sind die Parameter in Tabelle 9.2 nochmal zusammengefasst.

Tabelle 9.2: Parameter des Gipps-Fahrzeugfolgemodells

Parameter	Beschreibung
a_n	maximale Wunschbeschleunigung des Fahrers von Fahrzeug n
b_n	maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n
s_n	effektive Fahrzeuglänge des Fahrzeugs n (Fahrzeuglänge plus Abstand, den das Folgefahrzeug nicht bereit ist zu unterschreiten)
V_n	Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von Fahrzeug n
$\hat{b}$	durch den Fahrer von Fahrzeug n geschätzte maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n-1
τ	Reaktionsdauer des Fahrers

Bei der Bestimmung der Parameter ist darauf zu achten, dass Gipps vorsah, dass sein Modell in den Zeitschritten gerechnet wird, wie es die Reaktionsdauer, die für alle Fahrer einheitlich und konstant angenommen wurde, vorgab. Er selbst verwendete hierfür den Wert $\frac{2}{3}\,s$. Die Verkehrssimulation AIMSUN ermöglicht es, die Simulationsschrittweite unabhängig von der Reaktionsdauer zwischen 0,1 s und 1 s einzustellen. Die Reaktionsdauer kann dann als ein Vielfaches der Simulationsschrittweite gewählt werden. Diese ist für einen Fahrer für einen Simulationslauf konstant, kann aber zwischen den Fahrern nach einer einstellbaren Verteilungsfunktion variieren.

Insbesondere aus zwei Gründen wurde für die durchgeführten Simulationen bewusst nicht eine Simulationsschrittweite von 0,1 s gewählt. Zum einen bedeutet eine Simulationsschrittweite von 0,1 s, dass für alle Fahrzeuge in der Simulation alle 0,1 s ihre neue Geschwindigkeit und Position berechnet werden muss sowie ermittelt wird, ob das Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel durchführen will und kann. Der Fahrer hingegen kontrolliert in der Realität nicht in diesem feinen Zeitraster die Stellgrößen wie Bremspedalstellung, Gaspedalstellung oder Lenkwinkel [BM03]. Zum anderen würde der Zeitaufwand zur Durchführung der Simulationen bei dieser Simulationsschrittweite signifikant steigen.

Diese Berechnung wäre für die Simulation der Fahrzeuge, die mit einem VAS ausgestattet sind, gerechtfertigt, da dieses System ggf. eine kleinere Abtastrate besitzt (siehe Abschnitt 3.3). Daraus ergibt sich die Anforderung an eine Verkehrssimulation, für Assistenzsystem und Fahrer eine unterschiedliche Simulationsschrittweite zu berücksichtigen. Ein derartiger Ansatz ist bisher nicht bekannt. Der Aufbau und die Funktionsweise von AIMSUN müssten es aber grundsätzlich zulassen, die Simulationsschrittweite auf 0,1 s zu setzen und das VAS jeden Simulationsschritt zu aktualisieren. Für die Fahrzeuge mit menschlichem Fahrer nach dem Modell von Gipps würde in einer größeren Schrittweite die Geschwindigkeit und Fahrstreifenwahl bestimmt werden und innerhalb dieser Schrittweite bei konstanter Geschwindigkeit nur ihre Position innerhalb des Fahrstreifens neu berechnet

werden.

Experimentelle Untersuchungen haben für die Reaktionsdauer des Fahrers im Mittel einen Wert von etwa 0,7 s ergeben [Bur09], [GB09]. Daher wurde bei der folgenden Auswertung die Reaktionsdauer für alle Fahrer auf 0,7 s gesetzt und die Simulationsschrittweite zu dieser identisch gewählt.

Eine Schwierigkeit bei der Durchführung der Optimierung ergibt sich durch den zu identifizierenden Parameter $\hat{b}$. Dieser Parameter beschreibt die durch den Fahrer des folgenden Fahrzeugs angenommene maximale Wunschverzögerung des Fahrers des vorausfahrenden Fahrzeugs. AIMSUN bietet in der aktuellen Version unterschiedliche Implementierungen zur Bestimmung dieses Parameters während der Simulation [Aim09b]. Bei der Optimierung des Fahrzeugfolgeverhaltens zur Bestimmung dieses Parameters liegt die Schwierigkeit darin, dass der zu bestimmende Parameter $\hat{b}$ sowohl in der Veröffentlichung von Gipps [Gip81] als auch in allen Implementierungen in AIMSUN abhängig von dem noch zu bestimmenden Parameter b ist. Im Rahmen der Arbeit wurde sich für die „Car-Following Model Version 4.2: Deceleration estimation (Avg of Follower & Leader decelerations)“ [Aim09b] entschieden, die zum Zeitpunkt der Entscheidung die neueste Implementierung in AIMSUN darstellte. $\hat{b}$ wird dabei nach Formel (9.18) berechnet.

$$\hat{b} = \frac{1}{2}b_n + \frac{1}{2}b_{n-1} \tag{9.18}$$

mit

b_n	maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n
b_{n-1}	maximale Wunschverzögerung des Fahrers von Fahrzeug n-1

Auch bei der Anwendung dieser Formel bleibt die genannte Schwierigkeit bestehen. Um die Komplexität der Optimierungsaufgabe zu reduzieren, wurde in der Arbeit b_{n-1} zu vier angenommen und in Formel (9.18) verwendet. Der Wert vier entspricht dabei dem Mittelwert des im Simulationswerkzeug vorgegebenen Standardwertes von b. Da in Formel (9.18) auch die Wunschverzögerung des nachfolgenden Fahrzeugs b_n, dessen Wert durch die Optimierung festgelegt wird, eingeht, wird $\hat{b}$ nicht einheitlich angenommen, sondern ist vom Fahrer des Fahrzeugs n abhängig.

Mithilfe des genetischen Algorithmus mussten demnach die vier Parameter a, b, V sowie s bestimmt werden. Im Unterschied zur Beschreibung des Originalmodells in [Gip81] und der Implementierung in AIMSUN [Aim09b] beschreibt der bei der Optimierung identifizierte Parameter s nicht die in Tabelle 9.2 genannte effektive Fahrzeuglänge, sondern lediglich den Abstand, den der Fahrer bei Stillstand nicht bereit ist zu unterschreiten. In der Simulation wird die Position der Fahrzeuge stets als Position der Fahrzeugfront angegeben. Bei der Erhebung der empirischen Daten des Fahrzeugabstandes wird die Nettoweglücke ermittelt, also der Abstand zwischen Fahrzeugheck des vorausfahrenden Fahrzeugs zur Fahrzeugfront des nachfolgenden Fahrzeugs. Daher wurde die Optimierung so aufgesetzt, dass die Position des vorausfahrenden Fahrzeugs die Position des Fahrzeughecks beschreibt, die Position des nachfolgenden Fahrzeugs die Position der Fahrzeugfront beschreibt. Somit kann durch Bildung der Differenz direkt die Nettoweglücke bestimmt werden und mit den empirischen Messdaten verglichen werden. Die Fahrzeuglänge des vorausfahrenden Fahrzeugs, die in der ursprünglichen Beschreibung von s mit eingeht, ist für die Optimierung nicht von

Bedeutung. In AIMSUN selbst wird die Einstellung von s nicht direkt vorgenommen, sondern es werden auch in AIMSUN die Fahrzeuglänge und der minimal einzuhaltende Abstand getrennt vorgegeben. Somit kann der identifizierte Parameter s direkt in AIMSUN verwendet werden.

Für die Identifikation der Parameterwerte ist es notwendig, dem genetischen Algorithmus eine untere und obere Schranke für die Werte vorzugeben. In der Arbeit wurden die in Tabelle 9.3 angegebenen minimalen und maximalen Werte für die Parameter als Randbedingungen dem genetischen Algorithmus übergeben. Diese wurden sowohl für die Optimierung in Abschnitt 9.3 und in Abschnitt 9.4 verwendet.

Tabelle 9.3: Minimal und maximal zulässige Werte der Parameter bei der Parameteridentifikation

Parameter	minimaler Wert	maximaler Wert
a (m/s^2)	0,1	6,0
b (m/s^2)	-8,0	-0,1
s (m)	0,5	10,0
V (m/s)	10,0	44,0

9.3 Parameteridentifikation für eine synthetische Folgefahrt

Im Folgenden sollen mit dem gewählten genetischen Algorithmus und dem kombinierten Fehlermaß nach Theil's U für die gleichzeitige Betrachtung von Geschwindigkeit und Abstand (siehe Unterabschnitt 9.1.7) die Parameter für das Gipps-Fahrzeugfolgemodell bestimmt werden. Um die Leistungsfähigkeit des Algorithmus zur Identifikation der Parameterwerte zu bewerten, wurde sich in Anlehnung an [OH08] entschieden, in einem ersten Schritt die Parameterwerte für eine synthetische Folgefahrt zu identifizieren.

Eine synthetische Folgefahrt bedeutet, dass die Messdaten der Folgefahrt nicht empirisch erhoben wurden, sondern ein zeitlicher Verlauf der Geschwindigkeit für ein vorausfahrendes Fahrzeug vorgegeben und anhand des Gipps-Fahrzeugfolgemodells mit bekannten Parameterwerten der zeitliche Verlauf von Geschwindigkeit und Abstand eines nachfolgenden Fahrzeugs simuliert wurde. Nach der Generierung der künstlichen Folgefahrtdaten liegen die Fahrzeuggeschwindigkeiten beider Fahrzeuge sowie deren Abstand zueinander vor, die als Eingangsgrößen für den genetischen Algorithmus verwendet werden. Im Idealfall ist dieser in der Lage, die für die Erzeugung der synthetischen Daten verwendeten bekannten Parameterwerte des Gipps-Fahrzeugfolgemodells zu identifizieren.

In Unterabschnitt 5.2.1 wurde festgestellt, dass bisherige Untersuchungen von Fahrzeugfolgeverhalten vorwiegend mit Messdaten von mehreren Minuten Dauer, die mehrere Stopps enthalten, durchgeführt wurden. Für die Untersuchung der Eignung des gewählten Optimierungsverfahrens wurde daher eine Fahrt mit einem vergleichbaren Geschwindigkeitsverlauf aus den eigenen Messdaten ausgewählt. Die ausgewählte Fahrt beschreibt eine Fahrt auf dem Stadtring von Braunschweig, hat eine Dauer von 400 s und enthält mehrere Haltevorgänge an Lichtsignalanlagen (siehe Abbildung 9.4).

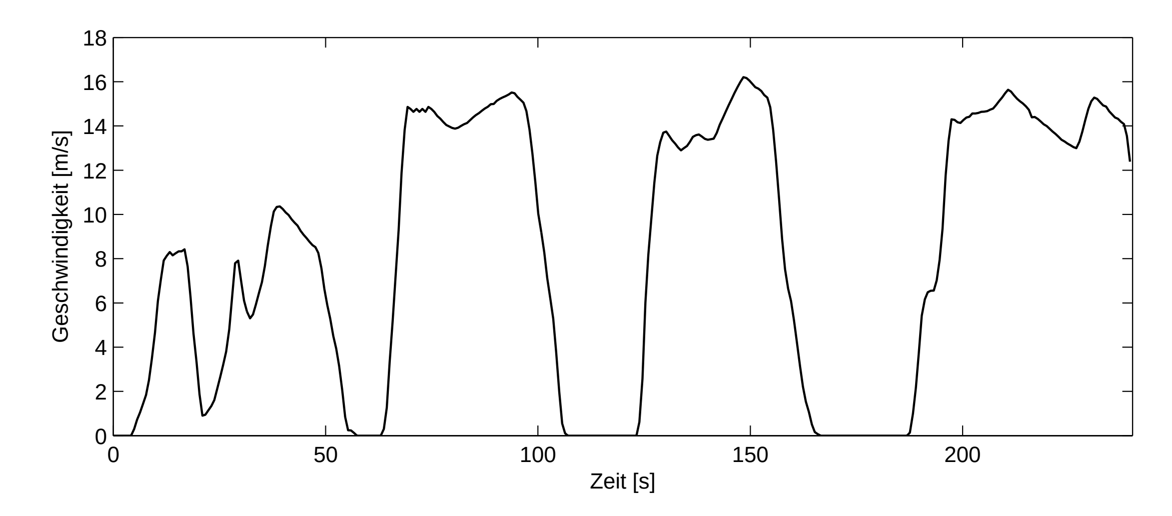


Abbildung 9.4: Geschwindigkeitsverlauf des vorausfahrenden Fahrzeugs

Um aus diesem Geschwindigkeitsverlauf eine synthetische Folgefahrt zu erzeugen, wurde das Gipps-Fahrzeugfolgemodell in Matlab nachgebildet. Mit den in der Tabelle 9.4 unter Generierung angegeben Werten für die Parameter und einer Startgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs von $v(t = 0) = 0\,m/s$ und einem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug von $\Delta x(t = 0) = 5\,m$ wurden mit dem Matlabmodell synthetische Messdaten einer Folgefahrt erhoben. Die resultierenden Trajektorien sind in Abbildung 9.5 dargestellt.

Tabelle 9.4: Werte der Parameter zur Erzeugung der synthetischen Folgefahrt sowie durch den genetischen Algorithmus identifizierten Werte

Parameter	Generierung	Versuch 1	Versuch 2a	Versuch 2b
a (m/s^2)	3,0	3,03	4,01	5,54
b (m/s^2)	-4,0	-3,95	-4,01	-4,01
tau (s)	0,7	-	-	-
s (m)	5,0	4.98	4,98	4,99
V (m/s)	$13{,}\overline{8}$	13,89	10,16	33,57

Diese Verläufe von Geschwindigkeit und Abstand wurden als Eingangsdaten für den genetischen Algorithmus verwendet. Da nur zu Vielfachen der bei der Erzeugung verwendeten Simulationsschrittweite synthetische Messdaten vorliegen, wurde der Wert für die Simulationsschrittweite und die Reaktionsdauer mit 0,7 s vorgegeben. Dieser entspricht dem bei der Erzeugung der synthetischen Daten verwendeten Wert.

Die Tabelle 9.4 zeigt für diese Folgefahrt in der Spalte „Versuch 1“ die Ergebnisse, die der genetische Algorithmus identifiziert hat. Es konnten dabei alle vier Parameter mit minimalen Abweichungen ($< 1{,}5\,\%$) bestimmt werden. Grundsätzlich scheint der gewählte genetische Algorithmus sowie das gewählte Fehlermaß sehr gut die Parameter identifizieren zu können.

Die oben genannten bisherigen Untersuchungen verwendeten stets Messfahrten von mehreren Minuten Dauer. So lange Folgefahrten liegen in den in dieser Arbeit erhobenen Messdaten relativ selten vor. Daher soll in der Versuchsreihe 2 anhand der synthetisch erzeugten

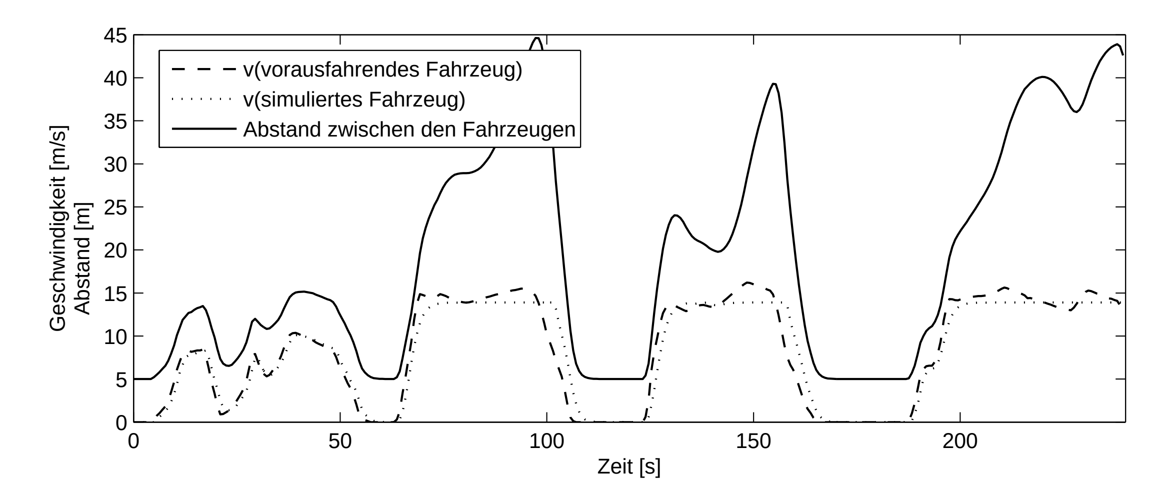


Abbildung 9.5: Geschwindigkeitsverlauf des vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugs sowie deren Abstandsverlauf

Folgefahrt untersucht werden, welche Auswirkung eine Verkürzung des betrachteten Zeitabschnitts für die Identifizierung der Parameterwerte zur Folge hat. Es wurde die oben dargestellte Folgefahrt in vier gleich lange Abschnitte von 60 s gekürzt, um zu versuchen, für diese Einzelabschnitte mit dem gleichen Algorithmus die Parameterwerte zu identifizieren.

Für die Abschnitte 2 bis 4 lieferte der genetische Algorithmus ebenfalls gute Ergebnisse, sodass ein betrachteter Abschnitt von 60 s ausreichend zur Bestimmung der Parameterwerte scheint. Nur für den ersten Abschnitt, der die ersten 60 s beschreibt, konnte der genetische Algorithmus nicht die ursprünglichen Parameter identifizieren. Daher sollen die Ergebnisse für diesen Abschnitt detailliert vorgestellt und erklärt werden. Zwei Ergebnisse der mehrmals durchgeführten Optimierung sind in Tabelle 9.4 in Spalte „Versuch 2a“ und „Versuch 2b“ dargestellt. Es fällt dabei auf, dass die ursprünglich verwendeten Parameter a und V nicht bestimmt werden konnten und die beiden Ergebnisse zusätzlich noch stark voneinander abweichen. Die Werte für b und s hingegen konnten erneut sehr gut bestimmt werden.

Die Ursache für diese Ergebnisse ist in der Modellstruktur des Gipps-Modells zu suchen. Als Safe-Distance-Modell werden im Gipps-Modell zwei Geschwindigkeitswerte berechnet und das Minimum dieser beiden Werte kommt zur Anwendung. Der erste Geschwindigkeitswert beschreibt das Ziel, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Der zweite Geschwindigkeitswert beschreibt das Ziel, in einem sicheren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu fahren. Die detaillierte Analyse des Endergebnisses des genetischen Algorithmus zeigt, dass für die Optimierungen der Versuchsreihe 2 der erste Geschwindigkeitswert in keinem Simulationsschritt (Versuch 2a) bzw. in nur drei Simulationsschritten (Versuch 2b) der ersten 60 s (mit insgesamt 84 Simulationsschritten) verwendet wurde. In allen anderen Simulationsschritten wurde der zweite Geschwindigkeitswert verwendet. Bei der Berechnung finden die Parameter a und V nur beim ersten Geschwindigkeitswert sowie die Parameter b und s nur beim zweiten Geschwindigkeitswert Verwendung. Da zur Beschreibung der Folgefahrt der erste Geschwindigkeitswert keinmal bzw. nur dreimal verwendet wurde, ist es zu erklären, dass nur die Parameter b und s sehr gut bestimmt werden konnten. Die ersten 60 s sind demnach nicht dafür geeignet, alle Parameter des Gipps-Fahrzeugfolgemodells zu

bestimmen. Sie enthalten anscheinend nicht genügend „Informationen“, um die verwendeten Parameterwerte rückwirkend zu identifizieren. Dieser Umstand kann aber anhand der Anzahl der Verwendung der ersten und zweiten Formel des Modells identifiziert werden und wurde bei der Interpretation der Ergebnisse des folgenden Abschnitts einbezogen.

9.4 Parameteridentifikation für empirische Folgefahrten

Nach der Bestimmung der Parameterwerte für das Gipps-Fahrzeugfolgemodell für eine synthetische Folgefahrt werden in diesem Abschnitt die empirisch aufgezeichneten Fahrzeugfolgevorgänge betrachtet. Dabei werden die Folgefahrten, in denen das Versuchsfahrzeug das nachfolgende zu einem vorausfahrenden Fahrzeug war, und die Folgefahrten, in denen das Versuchsfahrzeug das vorausfahrende zu einem nachfolgenden Fahrzeug war, unterschieden. Die betrachteten Folgefahrten erfüllen alle die folgenden Bedingungen:

- Die Folgefahrt wurde auf der Autobahn A2 aufgenommen.
- Die Folgefahrt dauerte mindestens 60 s.
- Während der Folgefahrt war das ACC-System des Versuchsfahrzeugs nicht aktiv.
- Während der Folgefahrt regnete es nicht.
- Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt 9.3 wurde festgelegt, dass jede der beiden Formeln aus der Gleichung von Gipps in mindestens 5 % der Berechnungsschritte verwendet werden muss.

Insgesamt erfüllten 79 Folgefahrten des Versuchsfahrzeugs und 85 Folgefahrten eines dem Versuchsfahrzeug nachfolgenden Fahrzeugs diese Bedingungen. Diese beschreiben Folgefahrten von einer Gesamtdauer von ca. 197 Minuten bzw. 222 Minuten mit einer durchschnittlichen Dauer von 149 s bzw. 157 s.

Wie bereits bei der Bestimmung für die synthetische Folgefahrt wurde bei der Betrachtung aller Folgefahrten der bereits vorgestellte genetische Algorithmus und das kombinierte Fehlermaß nach Theil’s U für die gleichzeitige Betrachtung von Abstand und Geschwindigkeit verwendet. Dabei wurden neben dem zur Optimierung verwendeten Theil’s U auch alle weiteren in Abschnitt 9.1 genannten Fehlermaße sowohl für den Abstand als auch für die Geschwindigkeit als betrachtete Kenngröße (MOE/MOP) berechnet. Für alle Folgefahrten sind in Anhang D die identifizierten Parameterwerte sowie die bestimmten Werte der Fehlermaße tabellarisch zusammengefasst.

9.4.1 Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug

Bei der ersten Durchsicht der Optimierungsergebnisse der betrachteten 79 Folgefahrten fiel auf, dass die identifizierten Parameter bei niedrigen gefahrenen Geschwindigkeiten des Versuchsfahrzeugs von den Parametern bei hohen Geschwindigkeiten abwichen. Daher werden im Folgenden die Optimierungsergebnisse in zwei Gruppen in Abhängigkeit der maximal während der betrachteten Folgefahrt gefahrenen Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs dargestellt. Die Grenze zwischen den beiden Gruppen wurde zu 20 m/s gewählt. Der untere Geschwindigkeitsbereich entspricht damit etwa dem Geschwindigkeitsbereich, in dem

auch bisherige Untersuchungen zum Fahrzeugfolgeverhalten durchgeführt wurden (vgl. Unterabschnitt 5.2.1). Der obere Geschwindigkeitsbereich wurde in bisherigen Untersuchungen weitestgehend nicht berücksichtigt. Insgesamt wurden 15 Folgefahrten für den unteren Geschwindigkeitsbereich und 64 Folgefahrten für den oberen Geschwindigkeitsbereich betrachtet, die die oben genannten Bedingungen erfüllen.

Im Folgenden werden zuerst die identifizierten Parameterwerte und das erreichte Fehlermaß für die Gruppe des oberen Geschwindigkeitsbereichs und anschließend für den unteren Geschwindigkeitsbereich dargestellt.

Abbildung 9.6 zeigt den durch die Optimierung erreichten Wert für das Fehlermaß in Abhängigkeit der betrachteten Folgefahrt. Das schlechteste Optimierungsergebnis wurde für Folgefahrt Nummer 58 mit einem Wert für das Fehlermaß von 0,218 erreicht. Das beste Ergebnis liegt für Folgefahrt Nummer 32 mit einem Fehlermaßwert von 0,011 vor. Der Mittelwert bei Berücksichtigung aller 64 Folgefahrten entspricht 0,0683.

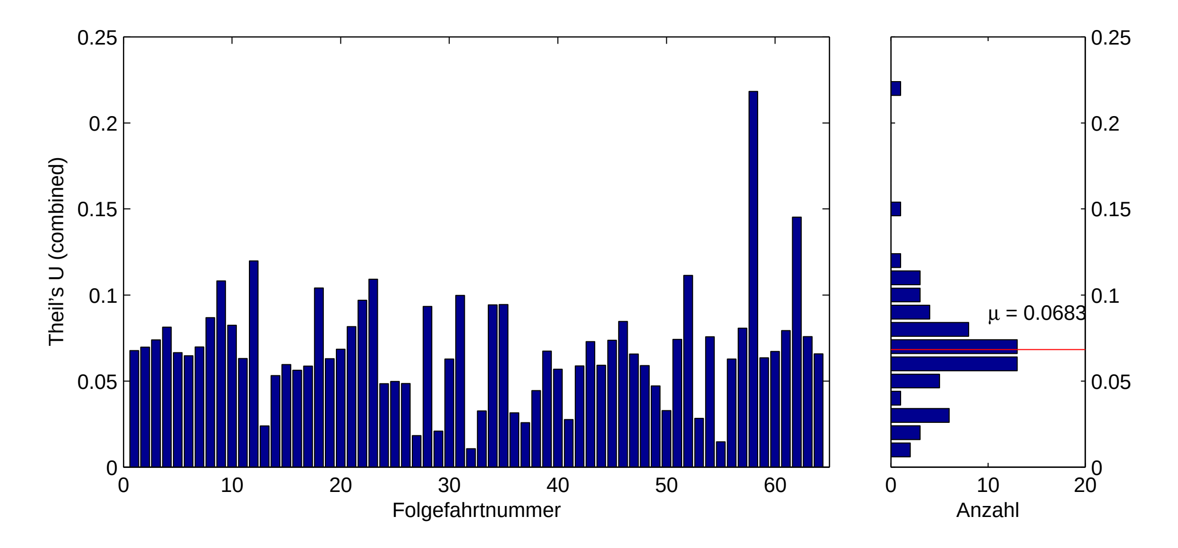
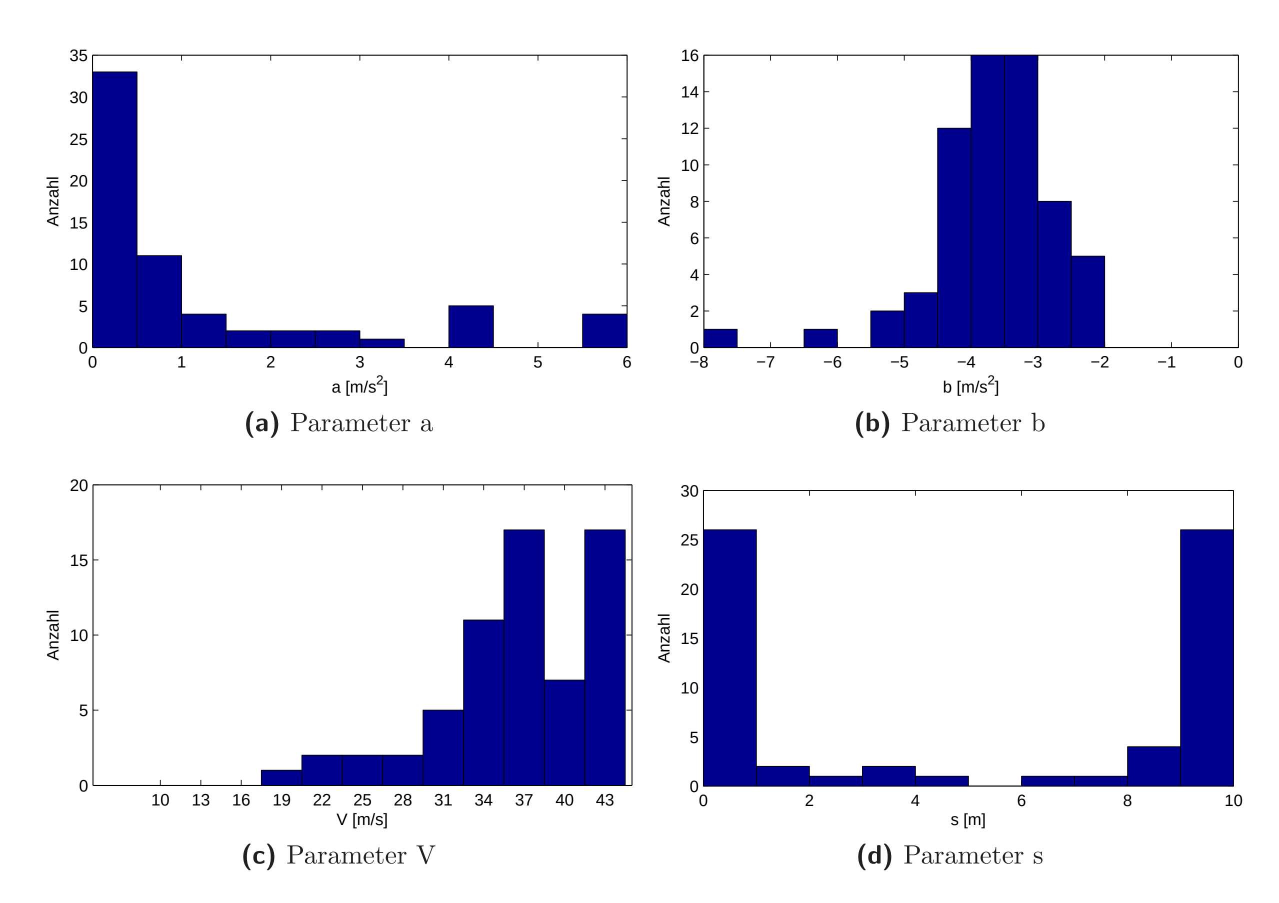


Abbildung 9.6: Werte von Theil's U für die Folgefahrten mit dem Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug (mit Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs $> 20\,\mathrm{m/s}$)

Die Häufigkeit der erhaltenen Parameterwerte ist in Abbildung 9.7 dargestellt. Die Klassenweite wurde dabei in Anlehnung an die Empfehlung in DIN 53804-1 [DIN02] und unter der Vorgabe einer einheitlichen Darstellung in allen folgenden Auswertungen gewählt.

In AIMSUN werden die einstellbaren Parameter von a, b, V und s als normalverteilt angesehen. Da die Darstellung in den Histogrammen in Abbildung 9.7 sehr stark von den eingestellten Klassengrenzen abhängig ist, eignet sich diese Darstellung nur für eine erste Abschätzung der zugrunde liegenden Verteilung. Die Darstellung in Tabelle 9.5 erlaubt anhand der ermittelten Werte von Median, Mittelwert, Standardabweichung sowie der Anzahl (in Prozent) der durch die Intervalle von $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ und $\mu \pm 3\sigma$ erfassten Werte eine aussagekräftigere Beurteilung, ob eine Normalverteilung vorliegt. Im Fall einer Normalverteilung entspricht der Wert des Median dem Mittelwert, und durch die Intervalle von $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ und $\mu \pm 3\sigma$ werden 68,27 %, 95,45 % und 99,73 % der Werte erfasst.

Der Mittelwert für a weicht stark vom Median ab, da eine rechtsschiefe Verteilung vorliegt. Die Verteilung der Parameterwerte von b lässt sich gut über eine Normalverteilung abbilden, da Mittelwert und Median gut übereinstimmen und die Anzahl der Werte in den



(a) Parameter a

(b) Parameter b

(c) Parameter V

(d) Parameter s

Abbildung 9.7: Häufigkeit der identifizierten Parameterwerte für das Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug (mit Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs $> 20\,\text{m/s}$)

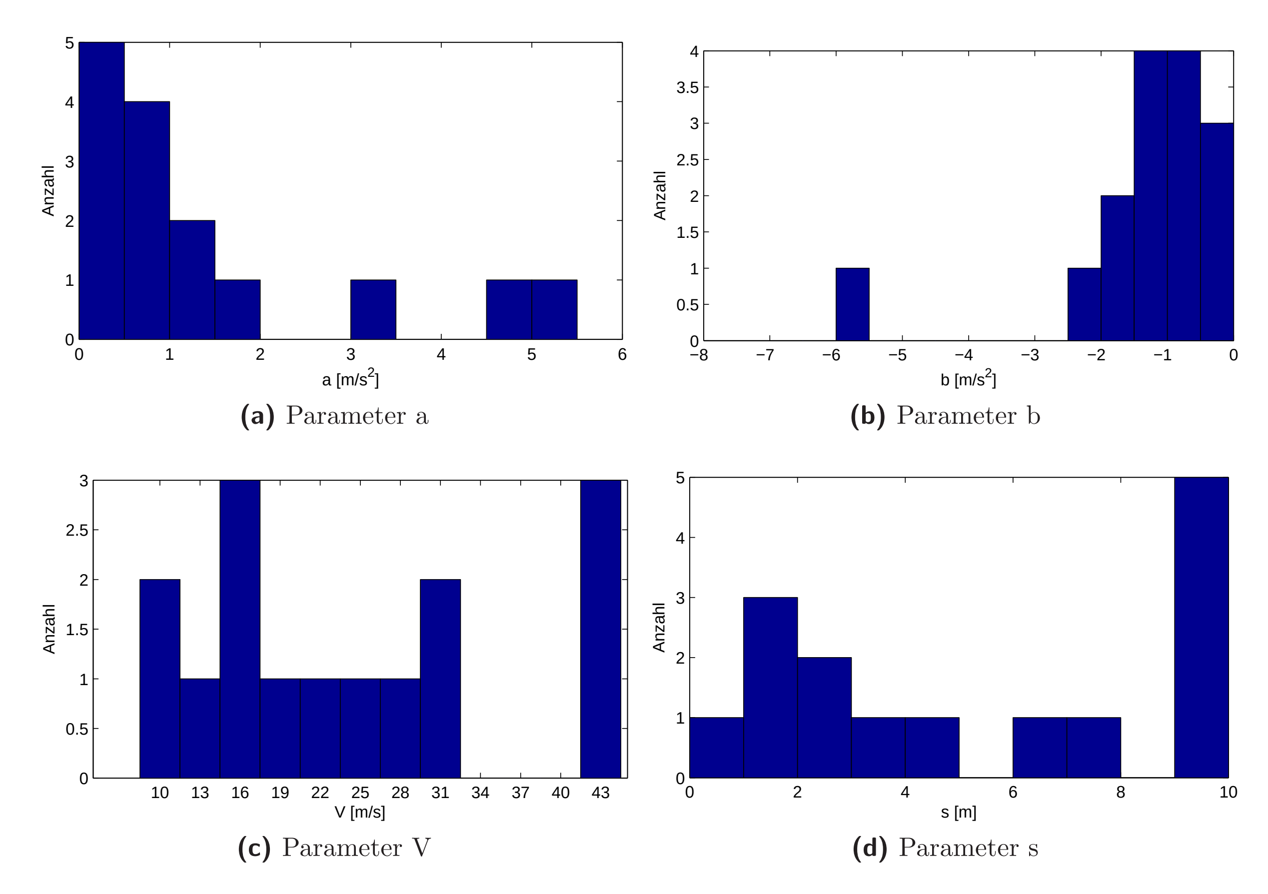
Intervallen $\mu \pm 1/2/3\sigma$ ungefähr der Anzahl, die von einer Normalverteilung erfasst würde, entspricht.

Für V und s stimmen der Median und Mittelwert zwar sehr gut überein, für den Bereich von $\mu \pm \sigma$ müssten aber 68,27 % der Werte erfasst werden, es werden allerdings nur 57,8 % bzw. 25,0 % der Werte erfasst. Die Annahme einer Normalverteilung ist für beide Parameter nicht gerechtfertigt. Bei der Ermittlung von V ist darauf zu achten, dass die Wunschgeschwindigkeit V, die Gipps beschreibt, die Geschwindigkeit für freie Fahrt ist. In den betrachteten Folgefahrten kann aber nur die aktuelle verkehrsabhängige Wunschgeschwindigkeit bestimmt werden. In AIMSUN ist die vom Fahrer aktuelle gewünschte Geschwindigkeit abhängig von seiner Wunschgeschwindigkeit V bei freier Fahrt, aber auch von vorhandenen Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie den Geschwindigkeiten der umgebenden Fahrzeuge (siehe Abschnitt 8.1). Für die erhaltenen Werte für s fällt auf, dass diese vorwiegend im Bereich der unteren und oberen vorgegebenen Grenze für den Parameterwert liegen. Dieser Umstand wird näher bei der Beschreibung des unteren Geschwindigkeitsbereichs behandelt.

Für die Folgefahrten, in denen das Versuchsfahrzeug maximal 20 m/s fuhr, war der Fehlermaßwert von 0,194 das schlechteste Optimierungsergebnis. Das beste Ergebnis liegt mit einem Fehlermaßwert von 0,0325 vor. Der Mittelwert bei Berücksichtigung aller 15 Folgefahrten entspricht 0,1321. Die Häufigkeit der identifizierten Parameterwerte ist in Abbildung 9.8 dargestellt.

Tabelle 9.5: Median, Mittelwert, Standardabweichung sowie prozentuale Anzahl der durch die Intervalle von $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ und $\mu \pm 3\sigma$ erfassten Werte für die identifizierten Parametern mit dem Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug (mit Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs $> 20\,\mathrm{m/s}$)

Parameter	Median	μ	σ	Anzahl erfasster Werte für das Intervall		
				$\mu \pm \sigma[\%]$	$\mu \pm 2\sigma[\%]$	$\mu \pm 3\sigma[\%]$
a	0.49	1.27	1.68	84.4	93.8	100.0
b	-3.61	-3.64	0.93	73.4	96.9	98.4
V	37.03	36.59	6.09	57.8	95.3	100.0
s	5.95	5.29	4.38	25.0	100.0	100.0
Normalverteilung				68.27	95.45	99.73



(a) Parameter a **(b)** Parameter b

(c) Parameter V **(d)** Parameter s

Abbildung 9.8: Häufigkeit der identifizierten Parameter für das Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug (mit Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs $< 20\,\mathrm{m/s}$)

Für diesen Geschwindigkeitsbereich wurde die oben genannte Bedingung, dass jede Formel der Gleichung von Gipps in mindestens 5 % der Berechnungsschritte pro Folgefahrt verwendet werden muss, nicht berücksichtigt. Insbesondere im niedrigen Geschwindigkeitsbereich kommt es vor, dass ausschließlich die Formel 2 verwendet wird, die das Folgen eines Fahrzeugs zu einem vorausfahrenden Fahrzeug und das Einhalten eines sicheren Abstandes beschreibt. Die Aussagekraft der Parameter a und V ist daher für diesen Geschwindigkeitsbereich im Einzelfall zu prüfen.

Auf die Darstellung von Median, Mittelwert und der prozentualen Anzahl der berücksichtigten Werte in den Intervallen von $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ und $\mu \pm 3\sigma$ wird hier aufgrund der geringen Anzahl der betrachteten Folgefahrten und der damit verbundenen geringen Aussagekraft verzichtet. Die Bestimmung ist mit den in Anhang D aufgeführten Ergebnissen möglich.

Die visuelle Beurteilung der Histogramme zeigt, dass die Verteilung der Werte für den Parameter a vergleichbar mit den Werten für den hohen Geschwindigkeitsbereich ist. Für den Parameter b wurden für diesen Geschwindigkeitsbereich fast ausschließlich Werte größer als -2 m/s^2 bestimmt, während bei hohen Geschwindigkeiten die Werte stets kleiner als -2 m/s^2 waren. Es scheint daher sinnvoll, den Wert des Parameters b in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit zu definieren. Zurzeit ermöglicht AIMSUN diese Art der Parameterwertevorgabe nicht.

Da in AIMSUN in der Formel 1 von Gipps die lokale Wunschgeschwindigkeit verwendet wird, sind die ermittelten Wunschgeschwindigkeiten teilweise sehr passend, teilweise aber nicht sinnvoll. Insbesondere die fünf Folgefahrten mit einer identifizierten Wunschgeschwindigkeit von größer 30 m/s sind als nicht passend einzustufen. Zu interpretieren wäre diese hohe Geschwindigkeit so, dass ein Fahrer der aktuell in einer Stausituation mit Geschwindigkeiten unter 20 m/s unterwegs ist, trotzdem so ein Fahrverhalten zeigt, als würde er auf die Wunschgeschwindigkeit größer 30 m/s beschleunigen wollen.

Die Abbildung 9.8 zeigt für den Parameter s zehn Werte, die kleiner als 8 m sind und fünf Werte, die nahezu den Wert 10 m haben. Bei der Durchsicht der detaillierten Messdaten fiel auf, dass der Wert von s nur dann sehr gut bestimmt werden konnte, wenn während der Folgefahrt die Fahrzeuggeschwindigkeit zu null wurde. Dieses ist an dem in Abbildung 9.9 gezeigten Beispiel gut zu erkennen. Die zusätzliche Schwierigkeit bei dieser Folgefahrt liegt darin, dass der Fahrer zwei Stopps macht und dabei einen unterschiedlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält. Beim ersten Stopp beträgt der Abstand ca. 0,9 m, beim zweiten Stopp etwa 1,8 m zum vorausfahrenden Fahrzeug. Dies kann als Intra-driver-Variabilität gedeutet werden. Das Modell von Gipps sieht für einen Fahrer nur einen einheitlichen Abstandswert beim Stillstand vor, den der Optimierungsalgorithmus identifizieren muss. Unter Berücksichtigung des Abstands- und Geschwindigkeitsverlaufs für die vollständige Folgefahrt wurde der Parameter s zu 1,99 m bestimmt.

In den Fahrten, in denen die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht null wurde, wurde häufig der Parameter s zu 10 m festgelegt. Abbildung 9.10 zeigt ein derartiges Beispiel. Das vorausfahrende und nachfolgende Fahrzeug fahren beide zur Messzeit Sekunde 3060 etwa 1 m/s bis 2 m/s. Der Fahrzeugabstand beträgt dabei ca. 17 m. Der Optimierungsalgorithmus findet für diese Folgefahrt den idealen Wert für s zu 10 m. Dieses ist bei Berücksichtigung des zugrunde liegenden Modells verständlich, da das Modell ein langsames Annähern des nachfolgenden Fahrzeugs nach Stillstand des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht kennt. Bei einem so großen Abstandswert bei diesen niedrigen Geschwindigkeiten findet der Optimierungsalgorithmus für dieses Modell daher zwangsläufig einen großen Wert für s, der den Abstand beim Stillstand festlegt. Für die Fahrten im oberen Geschwindigkeitsbereich wurde für den Parameter s festgestellt, dass der Wert hier häufig dem Wert der oberen oder unteren vorgegebenen Grenze für den Parameterwert entsprach. Nach der obigen Darstellung ist für den oberen Geschwindigkeitsbereich zu schließen, dass der Parameter s in diesen Fällen nicht sicher bestimmt werden konnte, da der Parameter in der Optimierung so eingestellt wurde, dass durch die Einstellung die aktuell betrachtete Folgefahrt möglichst gut wiedergegeben werden konnte. Eine Aussagekraft zum wahren Stillstandsabstand ist

aus diesen Optimierungsergebnissen nicht möglich.

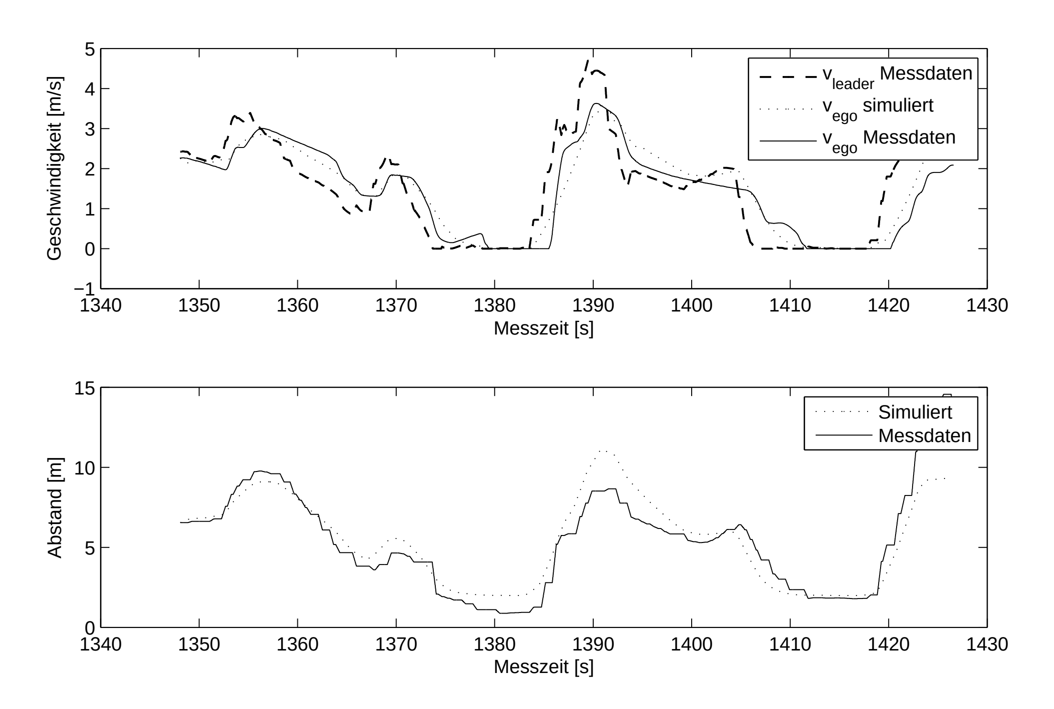


Abbildung 9.9: Beispiel 1 für eine Folgefahrt zur Erklärung der Wertebestimmung des Parameters s

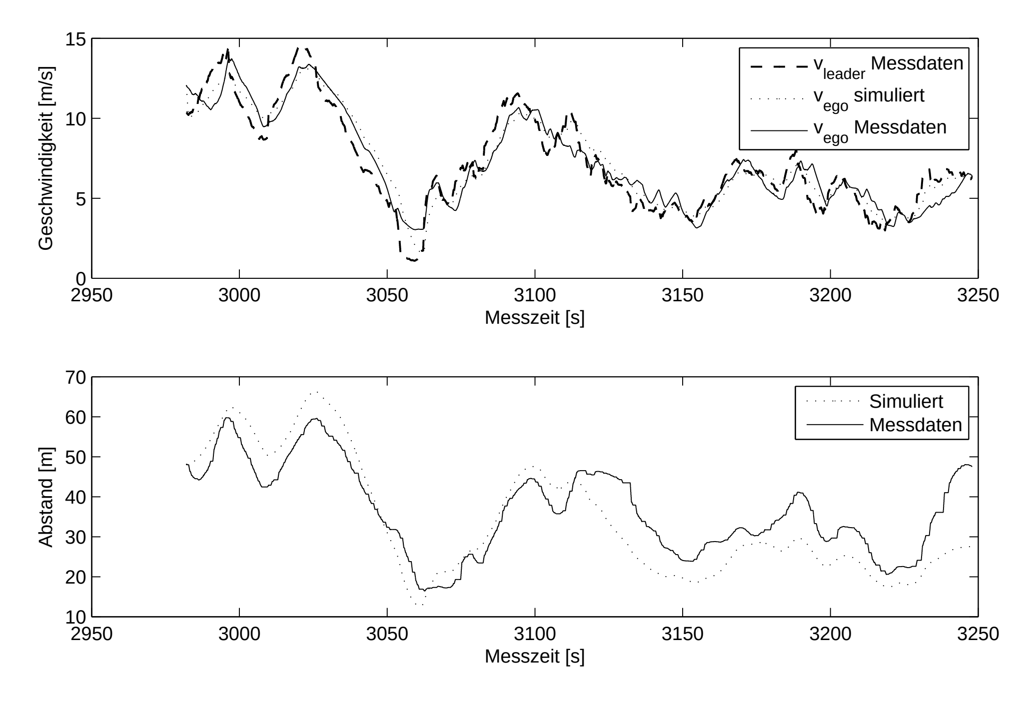


Abbildung 9.10: Beispiel 2 für eine Folgefahrt zur Erklärung der Wertebestimmung des Parameters s

9.4.2 Versuchsfahrzeug als vorausfahrendes Fahrzeug

Für die Parameteridentifikation der Folgefahrten für die nachfolgenden Fahrzeuge wurden 85 Datensätze, die jeweils eine Folgefahrt beschreiben, verwendet. Während im vorherigen Abschnitt die Versuchsfahrten von nur einem Fahrer des Versuchsfahrzeugs betrachtet wurden, wird in diesem Abschnitt eine Vielzahl an unterschiedlichen Fahrern betrachtet, die dem Versuchsfahrzeug folgten. Alle Folgefahrten erfüllen ebenfalls die zum Beginn des Abschnitts 9.4 genannten Bedingungen.

Wie zuvor werden die identifizierten Parameterwerte und die ermittelten Fehlermaße dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse der Kalibrierung sind in Anhang D aufgeführt.

Abbildung 9.11 zeigt den optimierten Wert für das Fehlermaß in Abhängigkeit der betrachteten Folgefahrt. Das schlechteste Optimierungsergebnis wurde für Folgefahrt Nummer 65 mit einem Fehlermaßwert von 0,201 erreicht. Das beste Ergebnis liegt für Folgefahrt Nummer 50 mit einem Wert des Fehlermaßes von 0,009 vor. Der Mittelwert bei Betrachtung aller 85 Folgefahrten liegt bei 0,078.

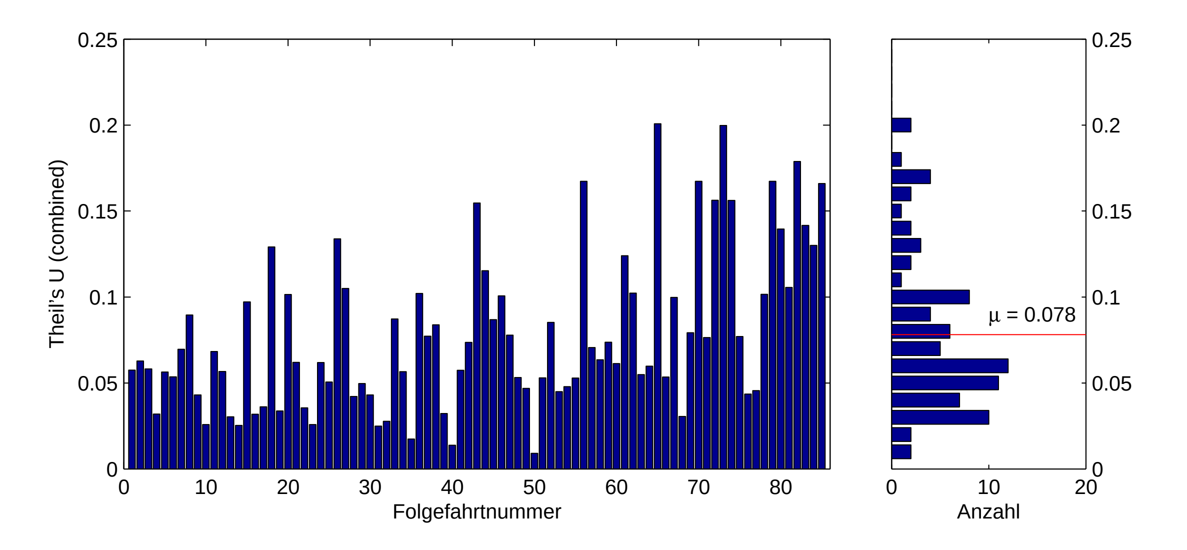


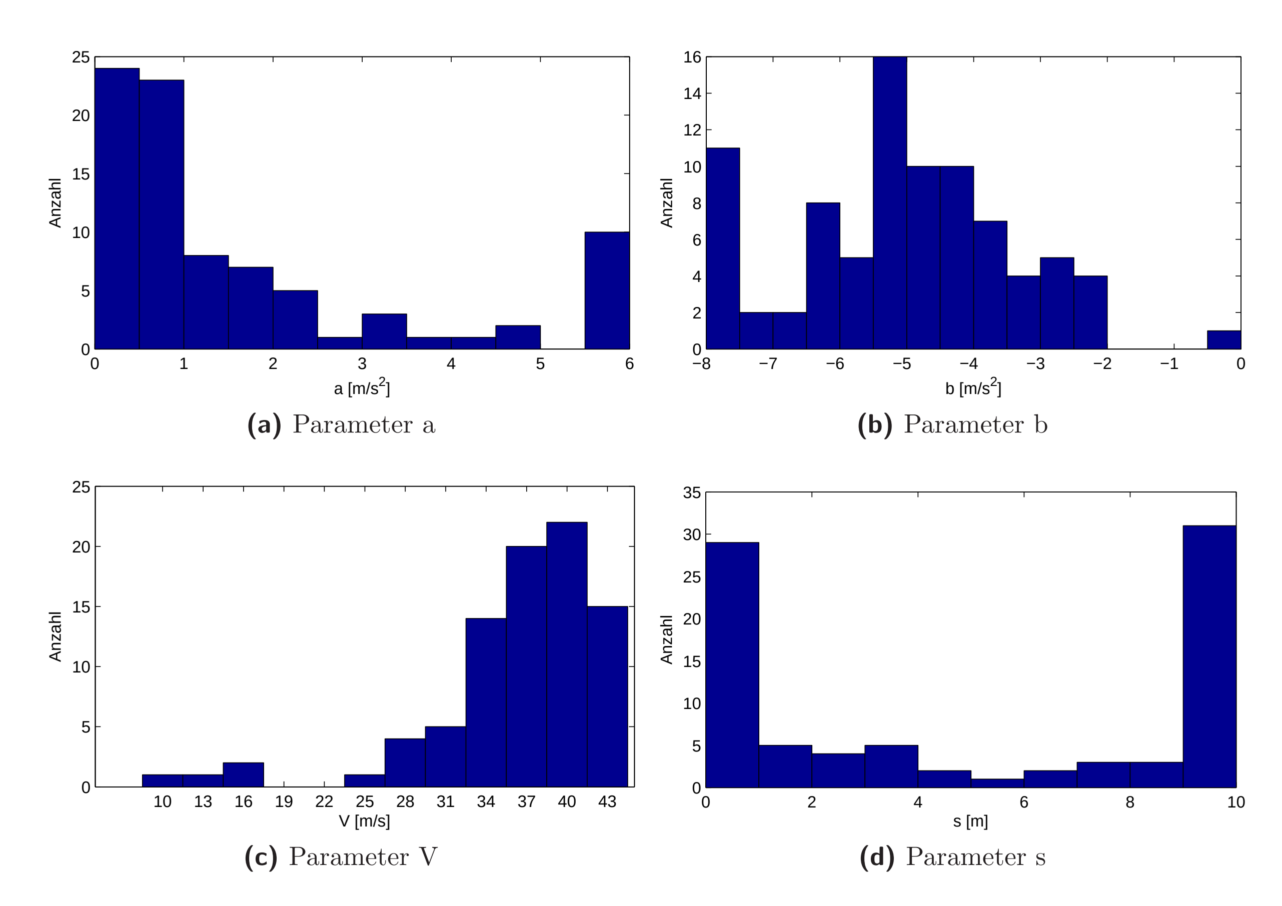
Abbildung 9.11: Werte von Theil's U für die Folgefahrten mit dem Versuchsfahrzeug als vorausfahrendes Fahrzeug

Die erhaltenen Parameterwerte sind in Abbildung 9.12 dargestellt.

Wie bereits für die Folgefahrten mit dem Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug soll auch für die hier untersuchten Folgefahrten der Wert von Median, Mittelwert, Standardabweichung sowie die prozentuale Anzahl der durch die Bereiche von Mittelwert $\pm 1\sigma$ bis $\pm 3\sigma$ erfassten Werte betrachtet werden (Tabelle 9.6).

Der Mittelwert für a weicht stark vom Median ab, da eine rechtsschiefe Verteilung vorliegt. Der Mittelwert ist für die nachfolgenden Fahrzeuge deutlich kleiner als der Standardparameterwert, wenn auch etwas größer als der zuvor für den Versuchsfahrer ermittelte Wert.

Anhand der Werte in Tabelle 9.6 lässt sich vermuten, dass sich die Verteilung der Parameterwerte von b wie bereits für den Versuchsfahrer gut über eine Normalverteilung abbilden lässt. Dabei ist der Mittelwert kleiner als der für den Versuchsfahrer bestimmte Wert und die Streuung größer. Bei der Abbildung mit einer Normalverteilung werden die häufig auftretenden Werte im Bereich zwischen -8 m/s^2 und -7,5 m/s^2 vernachlässigt.



(a) Parameter a **(b)** Parameter b

(c) Parameter V **(d)** Parameter s

Abbildung 9.12: Häufigkeit der identifizierte Parameter für das Versuchsfahrzeug als vorausfahrendes Fahrzeug

Tabelle 9.6: Median, Mittelwert, Standardabweichung sowie prozentuale Anzahl der durch die Intervalle von $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ und $\mu \pm 3\sigma$ erfassten Werte für die identifizierten Parameter mit dem Versuchsfahrzeug als vorausfahrendes Fahrzeug

Parameter	**Median**	μ	σ	**Anzahl erfasster Werte für den Bereich**		
				$\mu \pm \sigma[\%]$	$\mu \pm 2\sigma[\%]$	$\mu \pm 3\sigma[\%]$
a	0.93	1.73	1.88	83.5	88.2	100.0
b	-5.06	-5.07	1.67	69.4	98.8	100.0
V	37.55	36.30	6.71	72.9	95.3	96.5
s	3.69	5.07	4.19	29.4	100.0	100.0
Normalverteilung				68.27	95.45	99.73

Auffällig im Vergleich zu den vorherig betrachteten Messfahrten ist, dass diese kleinen Werte von b in den Folgefahrten des Versuchsfahrzeugs als nachfolgendes Fahrzeug nicht vorhanden waren. Bei der Durchsicht der grafischen Darstellung der empirischen und simulierten Folgefahrten fällt auf, dass diese kleinen Werte für b dann identifiziert wurden, wenn das nachfolgende Fahrzeug bei hohen Geschwindigkeiten dem Versuchsfahrzeug in geringem Abstand folgte. Dies ist auch anhand der mathematischen Formel von Gipps zu erkennen, da kleine Abstände bei hohen Geschwindigkeiten nur mit einem niedrigen Wert für b möglich sind. Da der Versuchsfahrer bei hohen Geschwindigkeiten größere Abstände

zum vorausfahrenden Fahrzeug einhielt, wurden für seine Folgefahrten nicht so niedrige Werte für b identifiziert.

Der Median und Mittelwert für V stimmen ebenfalls gut überein. In den Bereich von $\mu \pm \sigma$ müssten 68,27 % der Werte fallen, es werden allerdings 72,9 % erfasst. Der Wert der Streuung für die Wunschgeschwindigkeit ist als zu groß anzusehen, da in vielen Fällen nicht die Wunschgeschwindigkeit für freie Fahrt, sondern nur die vom Verkehrszustand abhängige Zielgeschwindigkeit ermittelt werden konnte.

Für den Parameter s ergeben sich vergleichbare Werte wie für die Fahrten mit dem Versuchsfahrzeug als nachfolgendes Fahrzeug. Bereits die grafische Darstellung zeigt deutlich, dass keine Normalverteilung vorliegen kann.

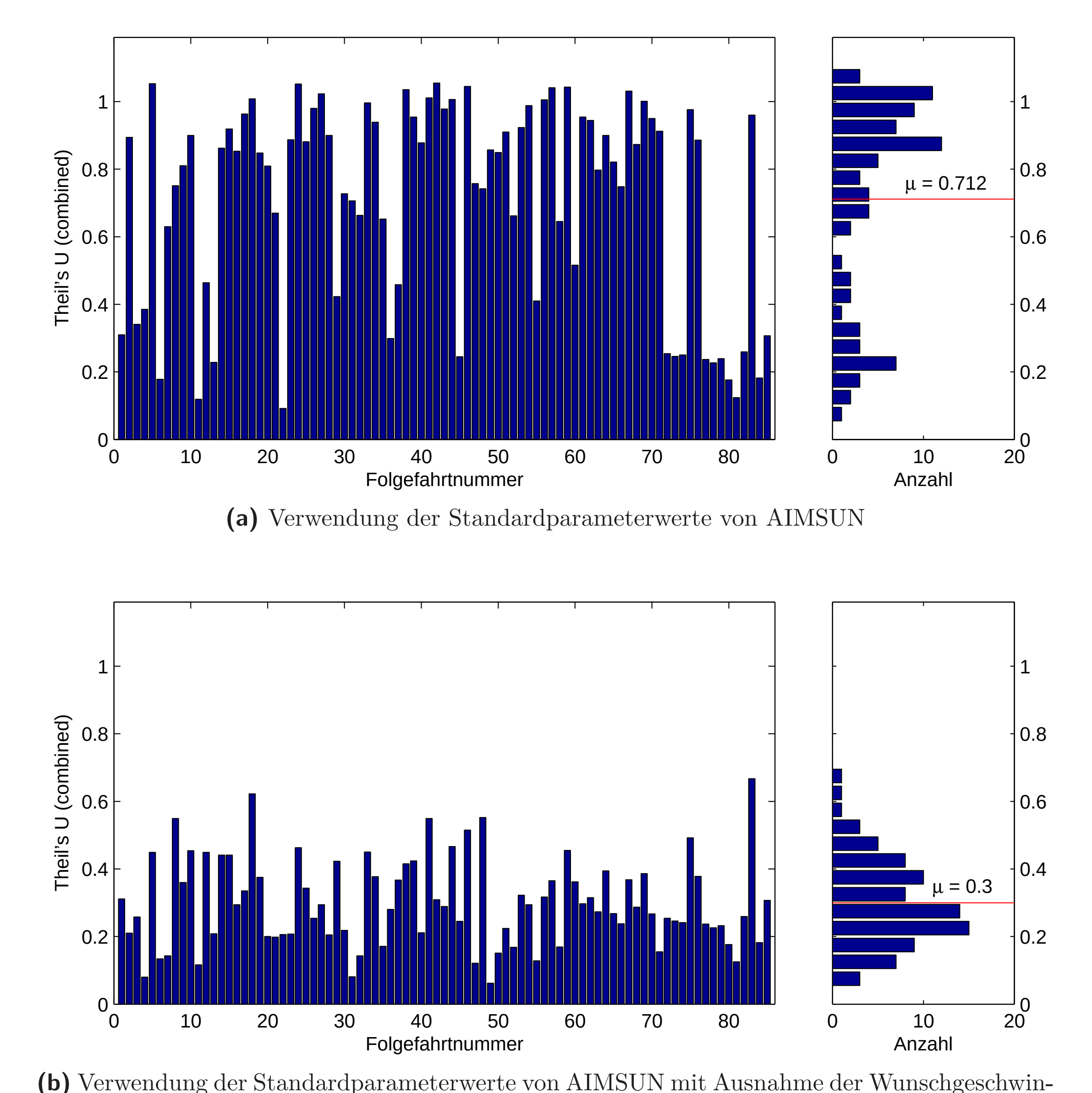
9.4.3 Bewertung des Optimierungsverfahrens

Um die Leistungsfähigkeit des Optimierungsverfahrens sowie die Notwendigkeit der Kalibrierung aufzuzeigen, wurde mit den in Tabelle 8.1 dargestellten Mittelwerten der Standardparameter das kombinierte Fehlermaß für Theil's U für alle 85 Folgefahrten ebenfalls berechnet. Es wurde sich bewusst für die Folgefahrten durch das nachfolgende Fahrzeug entschieden, um die Folgefahrten von einer Vielzahl an Fahrern mit den simulierten Folgefahrten der Standardparameter zu vergleichen. Das Ergebnis der Simulationen zeigt Abbildung 9.13a.

Das betrachtete Fehlermaß nimmt im Idealfall der vollständigen Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs von Geschwindigkeit und Abstand den Wert null, im schlechtesten Fall kann das Fehlermaß den Wert +2 annehmen. Mit den optimierten Parametern war der Fehlerwert von Theil's U im schlechtesten Fall für die betrachteten Fahrten 0,201. Bei Verwendung der Standardparameter haben 79 der 85 Folgefahrten einen Fehlerwert von größer als 0,201. Der Mittelwert der Fehlerwerte von Theil's U liegt nun bei 0,712, bei Verwendung der optimierten Parametersätze lag der Mittelwert bei 0,078, was eine Verbesserung um etwa einer Zehnerpotenz bringt.

Ein Problem beim Standardparametersatz ist, dass der Mittelwert für die Wunschgeschwindigkeit bei $30,\overline{5}\,\mathrm{m/s}$ liegt, in vielen Fahrten aber die gefahrene Geschwindigkeit deutlich höher ist. Mit diesen Einstellungen ergibt sich zwangsläufig ein Fehler, insbesondere bei der Betrachtung des Fahrzeugabstandes, da das nachfolgende simulierte Fahrzeug nur maximal die Wunschgeschwindigkeit erreichen kann, was einen immer größer werdenden Fehler im Abstand zur Folge hat. Um diesen Faktor beim Vergleich der Werte von Theil's U auszuschließen, wurde in einem zweiten Schritt die Wunschgeschwindigkeit für jede Folgefahrt auf den in der Folgefahrt maximal vorkommenden Geschwindigkeitswert gesetzt. Dieser Wert entspricht damit nicht mehr dem Standardwert des Simulationswerkzeugs. Die Simulation für alle 85 Folgefahrten wurde erneut durchgeführt und Theil's U berechnet. Das Ergebnis zeigt Abbildung 9.13b.

Der Mittelwert der Fehlerwerte konnte mit dieser Maßnahme auf 0,3 verringert werden, beträgt damit aber immer noch fast das Vierfache des Mittelwerts für die Fehlerwerte mit optimierten Parametern. Es haben immer noch 66 der 85 Folgefahrten einen Fehlerwert größer als 0,201. Die erhaltenen Werte für das Fehlermaß durch die Optimierung mit dem genetischen Algorithmus für die empirischen Folgefahrten sind daher als sehr gut anzusehen. Es verbleiben aber trotz der Optimierung nicht zu vernachlässigende Fehler bei der Abbildung des Verlaufs von Geschwindigkeit und Abstand des nachfolgenden Fahrzeugs.



(a) Verwendung der Standardparameterwerte von AIMSUN

(b) Verwendung der Standardparameterwerte von AIMSUN mit Ausnahme der Wunschgeschwindigkeit (auf die in der Folgefahrt maximal gefahrene Geschwindigkeit festgelegt)

Abbildung 9.13: Werte von Theil's U für die Folgefahrten mit dem Versuchsfahrzeug als vorausfahrendes Fahrzeug und Verwendung der Standardparameterwerte von AIMSUN

9.4.4 Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass der Parameter a durch eine rechtsschiefe Verteilung abzubilden ist. Die Annahme einer Normalverteilung, wie sie in AIMSUN vorgenommen wird, ist nicht haltbar. Der Parameterwert a für den Versuchsfahrer war tendenziell etwas kleiner als für die Fahrer der nachfolgenden Fahrzeuge. Insgesamt ist der Parameter a deutlich kleiner als in den Standardwerten angenommen.

Für den Parameter b kann für den Versuchsfahrer eine Normalverteilung angenommen werden. Für den Versuchsfahrer war für den Parameter b eine Unterscheidung zwischen Folgefahrten bei hohen und niedrigen Geschwindigkeiten notwendig, da der Wertebereich stark voneinander abwich. Für den hohen Geschwindigkeitsbereich entspricht der Mittelwert beinahe dem Wert des Standardparametersatzes. Die Standardabweichung ist aber deutlich größer. Dieses kann als Beschreibung der Intra-driver-Variabilität angesehen werden. Die in anderen Forschungsarbeiten häufig vorgenommene Verwendung von Messdaten, die bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten erhoben wurden, ist für die Kalibrierung zur Simulation des Verkehrsflusses auf Autobahnen als nicht geeignet anzusehen. Eine gegenteilige Annahme wäre entsprechend für den Anwendungsfall nachzuweisen.

Die Abbildung des Parameters b für die nachfolgenden Fahrzeuge mit einer Normalverteilung würde die Anzahl an Fahrern, die bei hohen Geschwindigkeiten einen sehr geringen Abstand einhalten, nicht wiedergeben können. Der Mittelwert ist kleiner als der Wert des Standardparametersatzes. Die Parameterwerte für b für die nachfolgenden Fahrzeuge unterscheiden sich stark von denen des Versuchsfahrers. Diese starke Abweichung kann durch den Hawthorne-Effekt, der Beeinflussung des Versuchsfahrers durch die Messung, hervorgerufen sein. Es ist anzunehmen, dass der Versuchsfahrer besonders vorsichtig mit dem Versuchsfahrzeug des Institutes unterwegs war.

Der Parameter V kann wie b nur eingeschränkt als normalverteilt angenommen werden. Eine Vielzahl an Folgefahrten hat den maximal zulässigen Wert für V als Wunschgeschwindigkeit identifiziert. In einigen Fällen ist diese Identifikation zulässig, da die betrachtete Folgefahrt in einem vergleichbaren Geschwindigkeitsbereich stattfand. Für die Folgefahrten hingegen, in denen das Folgefahrzeug nur mit geringen Geschwindigkeiten unterwegs war und trotzdem eine sehr hohe Wunschgeschwindigkeit identifiziert wurde, ist diese kritisch zu hinterfragen. Insgesamt sind die gefahrenen Geschwindigkeiten und die identifizierten Wunschgeschwindigkeiten deutlich größer als der Wert des Standardparametersatzes. Zu beachten ist, dass der ermittelte Geschwindigkeitswert stark von der Geschwindigkeit der umgebenen Fahrzeuge abhängig ist. Die Bestimmung der Wunschgeschwindigkeit V für freie Fahrt ist mit der gezeigten Auswertung nicht uneingeschränkt möglich. Der folgende Abschnitt wird daher eine alternative Möglichkeit zur Bestimmung aufzeigen.

Der Parameter s lieferte fast ausschließlich Werte im Bereich der oberen und unteren vorgegeben Grenze für den Parameter. Dieser Parameter beschreibt den Abstand, den die Fahrzeuge bei Stillstand nicht unterschreiten wollen. Für die dargestellten Parameterwerte in Abbildung 9.8 wurden nur Folgefahrten verwendet, in denen die maximal gefahrene Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs 20 m/s nicht überschreitet. Gerade hier scheint die Optimierung die besten Ergebnisse für den Parameter s zu liefern. Es erscheint daher sinnvoll, den Parameter s mit Folgefahrten aus dem niedrigen Geschwindigkeitsbereich, idealerweise mit Phasen des Stillstandes zu kalibrieren. Dies wird auch der Bedeutung des Parameters im Modell gerecht.

Die Darstellung in den vorherigen Abschnitten hat insgesamt die Notwendigkeit der

Kalibrierung aufzeigen können. Der Vergleich der Werte für das Fehlermaß der optimierten Parameterwerte mit den Werten für das Fehlermaß mit dem Standardparametersatz hat insbesondere aufgezeigt, dass durch die Optimierung der Wert des Fehlermaßes ca. um eine Zehnerpotenz verringert werden konnte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Durch die Kalibrierung konnte eine deutliche Verbesserung erreicht werden.
- Die Parameterwerte sind in der Simulation ggf. geschwindigkeitsabhängig einzustellen.
- Die Annahme einer Normalverteilung für die Parameterwerte ist stets zu prüfen und für die vorliegenden Messdaten insbesondere für den Parameter a als nicht zulässig anzusehen.
- Insbesondere der Parameter b hat aufgezeigt, dass sowohl eine Inter- als auch eine Intra-driver-Variabilität berücksichtigt werden muss.
- Der Parameter s ist für Folgefahrten mit Phasen des Fahrzeugstillstandes zu kalibrieren.
- Die Ermittlung der Wunschgeschwindigkeit V ist nur bei freier Fahrt möglich. Bei der durchgeführten Kalibrierung wird das Ergebnis stark von den Geschwindigkeiten der umgebenden Fahrzeuge beeinflusst. Eine alternative Methode zur Bestimmung der Wunschgeschwindigkeit V wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

9.5 Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten

Die Bestimmung der Wunschgeschwindigkeit V bei freier Fahrt ist mit der Optimierung anhand von Folgefahrten nur eingeschränkt möglich, da in vielen Fällen der Fahrzeugführer aufgrund der umgebenden Fahrzeuge nicht mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren kann.

Zwei weitere Möglichkeiten zur Bestimmung dieser Wunschgeschwindigkeit V sind alternativ realisierbar. Zum einen wäre es denkbar, aus den makroskopischen Messdaten der mittleren lokalen Geschwindigkeit, die von der stationären Sensorik der VRZ bestimmt wird, die Wunschgeschwindigkeit zu ermitteln. Problematisch dabei ist, dass die Geschwindigkeit an nur genau einem Ort bestimmt wird und damit ggf. eine starke örtliche Abhängigkeit vorhanden ist. Bei Vorliegen der mittleren lokalen Geschwindigkeit ohne Angabe einer Standardabweichung sind weitere Annahmen notwendig, um auf die Wunschgeschwindigkeit der Einzelfahrzeuge zu schließen.

Zum anderen ist die Bestimmung durch Betrachtung der Fahrzeuggeschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs entlang der Strecke möglich. Im vorgestellten Messkonzept ist vorgesehen, dass mehrere Versuchsfahrzeuge gleichzeitig auf einem vorgegebenen Streckenabschnitt eingesetzt werden. Durch Betrachtung des Geschwindigkeitsverlaufs der einzelnen Versuchsfahrzeuge entlang der Strecke kann auf die Wunschgeschwindigkeit geschlossen werden, wenn die Fahrt Abschnitte mit geringem Verkehrsaufkommen enthält. Ziel des Messkonzepts kann es daher nicht sein, nur in Stausituationen Daten zu erheben, da in diesem Fall die Wunschgeschwindigkeit nicht ermittelt werden kann. Beim Vorhandensein einer Geschwindigkeitsbegrenzung kann gleichzeitig die Einhaltung dieser für mehrere Fahrzeugführer bestimmt werden.

Da im Rahmen der Arbeit nur ein Versuchsfahrzeug und ein Versuchsfahrer eingesetzt wurden, werden für die folgende Betrachtung Messdaten vom Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU Braunschweig verwendet, die im Rahmen eines anderen Projektes erhoben worden sind und dem Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (iVA) zur Verfügung gestellt wurden. Vorteil dieser Untersuchung ist, dass nicht nur ein Fahrer, sondern mehrere Fahrer den gleichen Streckenabschnitt an mehreren Tagen gefahren sind. Im Rahmen des Projektes des IfF fuhren mehrere Probanden während einer Versuchsreihe im Januar und Februar 2009 jeweils eine Gesamtstrecke von ca. 600 km entlang der Autobahnen A2, A33, A44 und der A7. Für die folgende Auswertung wurde der Streckenabschnitt auf der Autobahn A2 von Braunschweig-Nord bis Lehrte-Ost betrachtet, der den Beginn der 600 km langen Gesamtstrecke ausmachte. Auf diesen Abschnitt gilt eine stationäre Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h. Dabei wurden die Fahrten von neun Fahrern in die Auswertung einbezogen. Details zum eingesetzten Versuchsfahrzeug sind in Anhang C angegeben. Da keine GPS-Positionsdaten aufgezeichnet wurden, musste die Festlegung des sich aus dem vorgebenden Streckenabschnitt resultierenden zu betrachtenden Zeitabschnitts durch manuelle Auswertung erfolgen.

Abbildung 9.14 zeigt die zeitlichen Anteile der gefahrenen Geschwindigkeiten in vier Geschwindigkeitsklassen separiert für jeden Fahrer. Abweichend von der Darstellung in den bisherigen Abschnitten sind die Geschwindigkeiten in diesem Abschnitt in km/h angegeben, da hierdurch ein besseres Verständnis für den Umfang der Geschwindigkeitsüberschreitung der Versuchsfahrer erreicht wird. Es ist zu erkennen, dass die Fahrer eine stark unterschiedliche Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten zeigen. Fahrer 7 fährt fast 80 % der Fahrzeit weniger als 120 km/h. Fahrer 1 und 9 fahren fast 50 % der Zeit zwischen 130 km/h und 140 km/h und damit gerade unterhalb der Grenze zum Bußgeld mit Punkten im Verkehrszentralregister, die bei Fahrten außerhalb geschlossener Ortschaften bei einer Überschreitung von 21 km/h liegt [BHJJ10]. Fahrer 1 überschreitet deutlich mit 20 % der Zeit die Geschwindigkeit von 140 km/h.

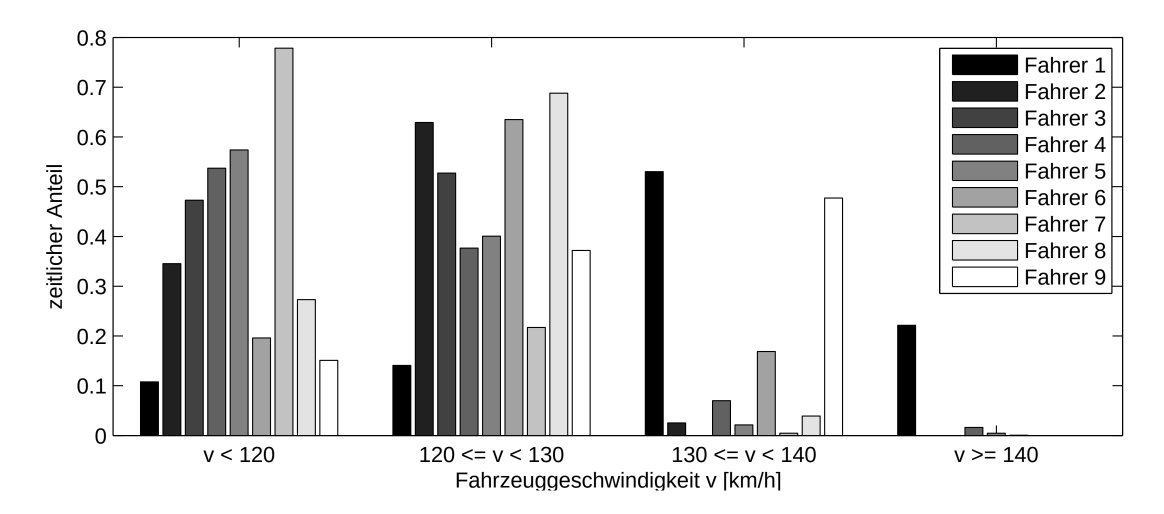


Abbildung 9.14: Zeitlicher Anteil der fahrerabhängigen Fahrzeuggeschwindigkeiten in Geschwindigkeitsklassen

Die Betrachtung der Mittelwerte und Standardabweichungen in Tabelle 9.7 zeigt, dass die mittlere Geschwindigkeit der Fahrer für diesen Streckenabschnitt für den langsamsten

Fahrer (7) von 114,7 km/h bis hin zum schnellsten Fahrer (1) von 133,0 km/h reicht. Bemerkenswert ist, dass diese beiden Fahrer die größte Standardabweichung von 8,7 km/h und 8,3 km/h bei der gefahrenen Geschwindigkeit aufweisen.

Tabelle 9.7: Mittelwert und Standardabweichung der gefahrenen Geschwindigkeiten

Fahrer-nummer	**mittlere Geschwindigkeit** $[km/h]$	**Standard-abweichung** $[km/h]$
1	133,0	8,7
2	121,9	5,3
3	118,6	6,8
4	120,1	7,5
5	119,0	6,4
6	124,9	5,5
7	114,7	8,3
8	121,8	5,5
9	127,9	6,7
	$\overline{\mu} = 122,4$	$\overline{\sigma} = 6,7$

Da die betrachteten Fahrten an unterschiedlichen Tagen stattfanden, ist bei den dargestellten Ergebnissen nicht auszuschließen, dass der aktuelle Verkehrszustand Auswirkungen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten hatte. Im geplanten Messkonzept sollen diese Messdaten durch den gleichzeitigen Einsatz von mehreren Fahrzeugen und dementsprechend mehreren Fahrern erhoben werden, sodass die Randbedingungen für alle Fahrer annähernd gleich sind.

Die detaillierte Bestimmung, ob die unterschiedlichen gefahrenen Geschwindigkeiten eines Fahrers ausschließlich auf das vorausfahrende Fahrzeug und den umgebenden Verkehrszustand oder auf eine Intra-driver-Variablität zurückzuführen sind, ist nur schwer möglich. Heutige Verkehrssimulationswerkzeuge bieten nur die Möglichkeit, eine Inter-driver-Variabilität abzubilden. Daher wäre es eine Möglichkeit, auf die Unterscheidung der Fahrer in Abbildung 9.14 zu verzichten und fahrerunabhängig die Fahrzeuggeschwindigkeiten zu betrachten. Die resultierende Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeiten ist in Abbildung 9.15 dargestellt.

Unter der Annahme einer Normalverteilung kann damit in AIMSUN eine Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten der Fahrer eingegeben werden. Für die vorliegenden Messdaten ergibt sich ein Mittelwert von 122,4 km/h bei einer Standardabweichung von 6,7 km/h. Das Problem bei dieser Betrachtung ist, dass auch der Einfluss durch die umgebenen Fahrzeuge mit eingeht und nicht von einer ausschließlichen freien Fahrt ausgegangen werden kann. Der Mittelwert von 122,4 km/h entspricht dem Wert von 34,0 m/s. Im Vergleich zu den während der Optimierung gefundenen Werten für die eigenen Messfahrten ist der Wert zu klein.

Eine alternative Möglichkeit wäre, ausschließlich die maximal gefahrene Geschwindigkeit pro Fahrer als Wunschgeschwindigkeit anzusehen. Dabei würde eine Intra-driver-Variabilität nicht berücksichtigt und eine auch nur kurzfristig gefahrene Maximalgeschwindigkeit würde als Wunschgeschwindigkeit für die vollständige Fahrt angenommen.

Um nicht den Maximalwert auswählen zu müssen, wurde im Folgenden der Mittelwert bestimmt, der sich bei der Betrachtung von nur 10 % des zeitlichen Anteils der Fahrt ergibt.

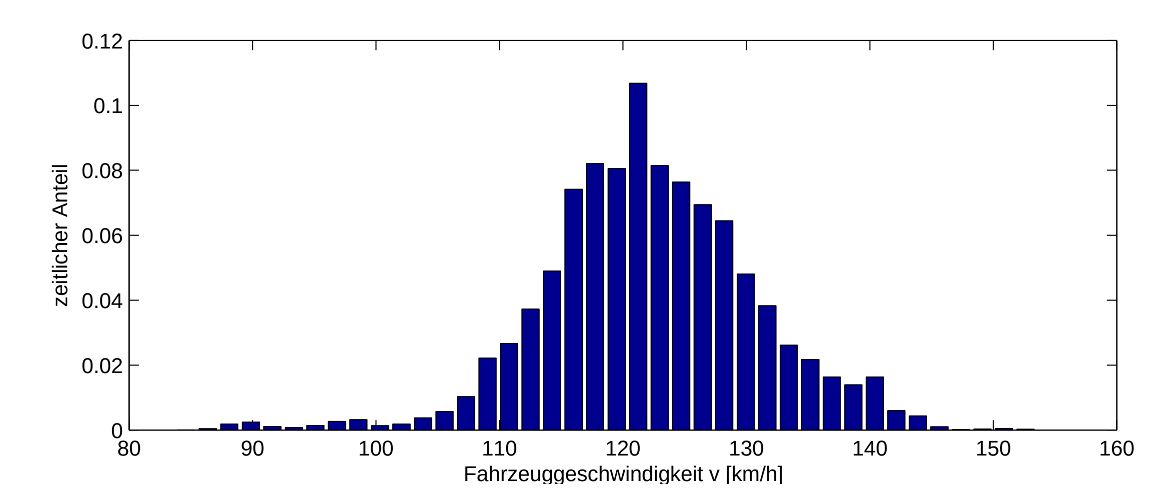


Abbildung 9.15: Zeitlicher Anteil der Fahrzeuggeschwindigkeiten in Geschwindigkeitsklassen

Diese 10 % wurden so bestimmt, dass in den verbleibenden 90 % der Fahrtdauer langsamer gefahren wurde als in den betrachteten 10 %. Dies beruht auf der Annahme, dass in diesem Anteil der Fahrer mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren konnte. Die sich ergebenden Mittelwerte sind in Tabelle 9.8 aufgeführt.

Tabelle 9.8: Gefahrene Geschwindigkeiten bei der Betrachtung nur des 10 % schnellsten Anteils hinsichtlich zeitlicher Dauer

Fahrernummer	**mittlere Geschwindigkeit** $[km/h]$
1	143,0
2	129,7
3	127,3
4	134,6
5	129,6
6	134,0
7	126,9
8	129,6
9	136,6
	$\overline{\mu} = 132,4 \quad \sigma = 5,2$

Der Mittelwert der Mittelwerte aus Tabelle 9.8 ist 132,4 km/h (36,7 m/s) mit einer Standardabweichung von 5,2 km/h (1,4 m/s).

In obiger Darstellung konnte die Schwierigkeit der Bestimmung der Wunschgeschwindigkeit aufgezeigt werden. Die Optimierung liefert eine Wunschgeschwindigkeit, die lediglich für die eine betrachtete Folgefahrt Geltung besitzt und von dem vorausfahrenden und den umgebenden Fahrzeugen stark beeinflusst wird. Die Betrachtung der gefahrenen Geschwindigkeiten auf dem gesamten Streckenabschnitt des Versuchsfahrzeugs des IfF bezieht ebenfalls stark die Einflüsse der umgebenden Fahrzeuge mit ein. Für die betrachteten Messdaten scheint die Betrachtung des 10 %-Anteils der schnellsten Geschwindigkeiten ein nachvollziehbares Ergebnis für die Wunschgeschwindigkeit zu liefern. Die Streuung von nur

5,2 km/h scheint gering und könnte bei Betrachtung eines umfangreicheren Fahrerkollektivs größer werden.

9.6 Mikroskopische Kalibrierung des Fahrstreifenwechselverhaltens

Eine Literaturrecherche und die Diskussion mit anderen Wissenschaftlern brachte die Erkenntnis, dass, obwohl eine Vielzahl an Datenerhebungen zum Fahrstreifenwechselverhalten durchgeführt wurden (vgl. [Ols03]), eine Kalibrierung auf mikroskopischer Ebene bislang nur das Fahrzeugfolgeverhalten und nicht das Fahrstreifenwechselverhalten erfasst. Diese Datenerhebungen wurden mit den Zielen durchgeführt, ein neues Modell zur Abbildung des Fahrstreifenwechselverhaltens zu erstellen und in ein Verkehrssimulationswerkzeug zu integrierten [HW04], mithilfe eines Modells eine Unfallursachenanalyse durchzuführen [Ols03] sowie modellbasiert das Design von Fahrerassistenzsystemen zu unterstützen [BSK+10]. Eine der wenigen Ausnahmen bildet die Dissertation von Toledo [Tol03] (sowie die Vorarbeiten hierzu [ABAKM96]), in der ein integriertes Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodell entworfen und dieses auf mikroskopischer Ebene kalibriert wird. Der Autor bestimmt aus Messdaten von Videoaufzeichnungen aus dem Jahr 1983 (siehe Unterabschnitt 5.2.3) die Anzahl der Fahrstreifenwechsel sowie die Relativgeschwindigkeit und den Abstand zum vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen beim Fahrstreifenwechsel.

Für die Fahrzeugfolge existiert eine Vielzahl an Untersuchungen und Vergleichen für unterschiedliche Modellansätze (siehe Unterabschnitt 5.2.1). Ein systematischer Vergleich von verschiedenen Fahrstreifenwechselmodellen ist nicht bekannt und nur schwer durchzuführen [Har07].

Ein Ansatz zur Erhebung geeigneter Messdaten zur Untersuchung des Fahrstreifenwechselverhaltens mit dem aufgebauten Versuchsfahrzeug wurde in Abschnitt 6.4 beschrieben. Ein Vorgehen zur Kalibrierung eines Fahrstreifenwechselmodells auf mikroskopischer Ebene ist stark vom verwendeten Modell abhängig und stellt zusammen mit der Messdatenerhebung ein noch wenig bearbeitetes Forschungsgebiet dar, das in zukünftigen Arbeiten Berücksichtigung finden sollte.

9.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Fehlermaße und Optimierungsverfahren zur Kalibrierung von Fahrzeugfolgemodellen vorgestellt. Es wurde die Notwendigkeit der detaillierten Betrachtung des verwendeten Fehlermaßes (inkl. der verwendeten Kenngröße) bei Aussagen zum „prozentualen Fehler“ eines Modells und beim Vergleich von Forschungsergebnissen aufgezeigt. Basierend auf den Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten wurde im Rahmen der Arbeit ein genetischer Algorithmus zur Optimierung der Parameterwerte des Gipps-Fahrzeugfolgemodells realisiert. Hierzu wurde ein kombiniertes Fehlermaß auf Basis von Theil's U mit Berücksichtigung der Kenngrößen Fahrzeugabstand und Fahrzeuggeschwindigkeit verwendet.

Die Eignung des verwendeten Fehlermaßes und Algorithmus zur Parameteroptimierung wurde anhand einer synthetischen Folgefahrt nachgewiesen. Aufgrund der Verwendung des

Minimums der Ergebnisse von zwei Gleichungen für jeden Simulationsschritt im Gipps-Fahrzeugfolgemodell können für vereinzelte Folgefahrten Parameter identifiziert werden, die als nicht vertrauenswürdig einzustufen sind, da für die Folgefahrt für alle Simulationsschritte nur das Ergebnis einer Gleichung verwendet wurde. Die Parameter, die in die andere Gleichung eingehen, sind daher für einen bestimmten Wertebereich beliebig. Diese Folgefahrten wurden in den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Optimierung zeigten, dass durch die Kalibrierung eine deutliche Verbesserung der Abbildung im Vergleich zur Verwendung der Standardparameter erreicht werden konnte. Die von AIMSUN vorgesehene Normalverteilung für die Parameterwerte konnte insbesondere für den Parameter a nicht bestätigt werden. Insbesondere die Parameterwerte für b konnten eine Inter- als auch Intra-driver-Variabilität aufzeigen, sowie die Notwendigkeit einer geschwindigkeitsabhängigen Parametrierung. Bei der durchgeführten Kalibrierung wird die zu bestimmende Wunschgeschwindigkeit V stark von den Geschwindigkeiten der umgebenden Fahrzeuge beeinflusst. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Wunschgeschwindigkeit V aus den Messdaten von Versuchsfahrten mit mehreren Versuchsfahrern wurde aufgezeigt.

Die mikroskopische Kalibrierung des Fahrstreifenwechselverhaltens wurde nicht durchgeführt. Sowohl die Erfassung geeigneter Kenngrößen als auch die Kalibrierung selbst stellt ein noch wenig bearbeitetes Forschungsgebiet dar und bietet Potential für zukünftige Forschungsarbeiten.

Für die nachfolgenden Untersuchungen in Kapitel 10 wurden die Parameter für das Fahrzeugfolgeverhalten der Pkws in der Simulation mit den in diesem Kapitel bestimmten Mittelwerten, Standardabweichungen sowie Werten für die obere und untere Begrenzung verwendet. Dabei wurden die Werte für die Beobachtung der nachfolgenden Fahrzeuge verwendet, um ein möglichst großes Fahrer- und Fahrzeugkollektiv zu berücksichtigten. Es musste dabei die Einschränkung hingenommen werden, dass AIMSUN die Parameterwerte stets als normalverteilt annimmt.

10 Methoden zur mikroskopischen und makroskopischen Validierung

Das in Kapitel 6 dargestellte Konzept integriert die mikroskopische und makroskopische Validierung des verwendeten Simulationsmodells. Die zu verwendenden Kenngrößen für diese Validierung wurden in Abschnitt 6.2 ermittelt. In diesem Kapitel werden Methoden zur Validierung auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene vorgestellt.

Die Validierung von Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens wurde in bisherigen Forschungsarbeiten nur mit wenigen betrachteten Folgefahrten durchgeführt (siehe Unterabschnitt 5.2.1). In Abschnitt 10.1 wird eine Methode vorgestellt, die eine Validierung mit einer größeren Gesamtheit an Folgefahrten ermöglicht, die damit die Herleitung allgemeingültiger Aussagen erlaubt.

Aufgrund des noch wenig bearbeiteten Forschungsgebiets der mikroskopischen Kalibrierung von Fahrstreifenwechselmodellen (siehe Abschnitt 9.6), kann an dieser Stelle noch keine vollständige Validierungsmethode auf mikroskopischer Ebene vorgestellt werden. Grundsätzlich könnten unter anderem der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug relevante Kenngrößen bei der Validierung sein.

Das Konzept zur makroskopischen Validierung ist in Abbildung 10.1 dargestellt.

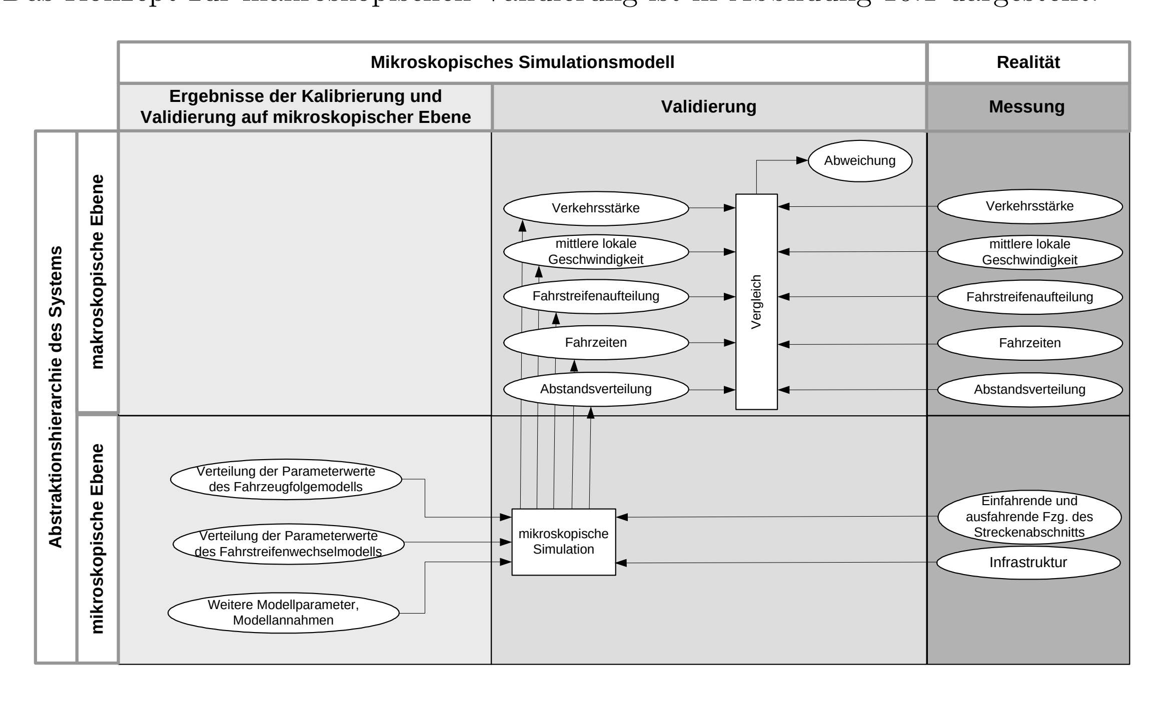


Abbildung 10.1: Makroskopische Validierung eines mikroskopischen Verkehrssimulationsmodells zur Untersuchung von VAS

Das empirisch bestimmte Verkehrsaufkommen wird in der Simulation über die ein- und

ausfahrenden Fahrzeuge nachgebildet. Die während der Kalibrierung ermittelten Verteilungen der Parameterwerte für die unterschiedlichen Teilmodelle werden in der Simulation hinterlegt. Im Rahmen der Arbeit wurden die in Abschnitt 9.4 ermittelten Parameterwerte für das Fahrzeugfolgemodell verwendet, die verbleibenden Parameterwerte wurden auf den Standardwerten des Simulationswerkzeugs belassen. Die Simulationsergebnisse ermöglichen den Vergleich mit den empirischen Messdaten hinsichtlich mehrerer Kenngrößen (siehe Abbildung 10.1). Entsprechende Methoden für den Vergleich werden in Abschnitt 10.2 für die Verkehrsstärke und die mittlere lokale Geschwindigkeit, in Abschnitt 10.3 für die Fahrstreifenaufteilung, in Abschnitt 10.4 für die Fahrzeiten sowie in Abschnitt 10.5 für die Abstandsverteilungen aufgezeigt und exemplarisch durchgeführt sowie die Ergebnisse beschrieben und bewertet. Das Kapitel schließt in Abschnitt 10.6 mit einer Zusammenfassung.

10.1 Fahrzeugfolgeverhalten

Die Vorgehensweise in bisherigen Arbeiten zur Kalibrierung und Validierung von Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens wurde in Unterabschnitt 5.2.1 und Abbildung 5.3 dargestellt. Aufgrund der Vorgehensweise kann die Aussage aus diesem Vorgehen nur sein, wie gut das Modell mit einem identifizierten Parametersatz für eine Folgefahrt auch die anderen $n-1$ Folgefahrten abbilden kann. Die Aussage beschränkt sich dabei also stets darauf, wie sich die betrachteten Folgefahrten relativ zueinander verhalten.

Neben dieser eingeschränkten Aussagekraft ist der Aufwand für diese Art der Validierung sehr groß. Da für jede der n Folgefahrten ein Parametersatz identifiziert wurde, müssen beim Vergleich mit allen anderen $(n-1)$ Folgefahrten insgesamt $(n-1)n$ Kombinationen während der Validierung betrachtet werden. In den bisherigen Arbeiten wurde aufgrund häufig nur eingeschränkt verfügbarer Messdaten für dieses Vorgehen nur eine geringe Anzahl an Folgefahrten und damit nur eine eingeschränkte Stichprobe betrachtet. So werden z. B. in der Arbeit von Kesting [Kes08] nur drei Folgefahrten betrachtet, wobei die Repräsentativität dieser Folgefahrten besonders infrage zu stellen ist.

Aus den oben genannten Gründen wird die bisherige Vorgehensweise für die hier notwendige Validierung als unzureichend angesehen. Zielführender scheint das in Abbildung 10.2 gezeigte Vorgehen. Hierzu sind n Folgefahrten eines betrachteten Zeitraums A und m Folgefahrten eines vergleichbaren Zeitraums B, die unter vergleichbaren Bedingungen erhoben worden sind, notwendig. Für alle Folgefahrten $n+m$ werden durch die Optimierung unter Einhaltung eines maximal zulässigen Fehlermaßes die Parameterwerte des Modells bestimmt. Hieraus ergeben sich sowohl für den Zeitraum A als auch für den Zeitraum B Verteilungen der Parameterwerte.

Das Ziel der Validierung auf mikroskopischer Ebene für die Modelle des Fahrzeugfolgeverhaltens muss es sein, die angenommenen Verteilungsfunktionen für die Parameterwerte aus dem Zeitraum A mit den Verteilungsfunktionen für den Zeitraum B zu bestätigen. Dabei können die Verteilungen z. B. durch ihre Lageparameter, Streuungsparameter und Formparameter verglichen werden.

Die Machbarkeit dieses Vorgehens hängt entscheidend von der Anzahl der beobachteten Folgefahrten ab. Beim Einsatz von zehn oder mehr Versuchsfahrzeugen und Verwendung der Messdaten der nachfolgenden Fahrzeuge sollten für eine Fahrt von Braunschweig nach Hannover bereits ausreichend Folgefahrten vorhanden sein, um z. B. die erhaltenen Para-

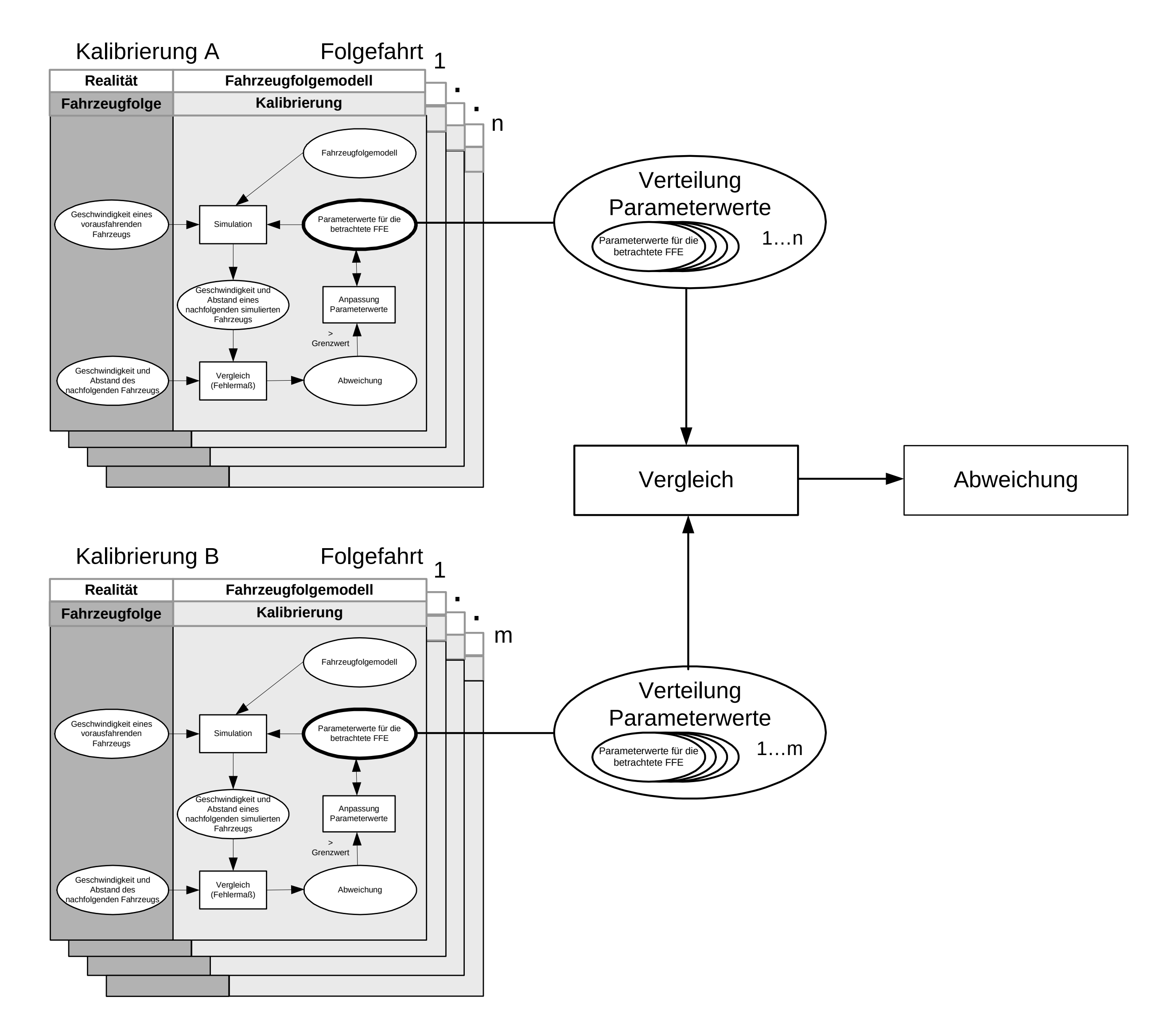


Abbildung 10.2: Mikroskopische Validierung des Fahrzeugfolgemodells

meterverteilungen für die Folgefahrten von einem Tag (Zeitraum A) mit den Folgefahrten eines anderen Tages (Zeitraum B) validieren zu können. Da im Rahmen dieser Arbeit nur von einem Versuchsfahrzeug Folgefahrten erhoben wurden, liegen für einzelne Tage nur wenige beobachtete Folgefahrten vor, die die Erstellung einer aussagekräftigen Verteilung der Parameterwerte nicht erlauben.

10.2 Verkehrsstärke und mittlere lokale Geschwindigkeit

Nach der Validierung auf mikroskopischer Ebene schließt sich die Validierung auf makroskopischer Ebene an. In bisherigen Ansätzen [VMS08], [FV01], [Wit96], [Gip81] wird die Darstellung des Fundamentaldiagramms zum Vergleich von Simulation und Empirie verwendet. In dieser Darstellung ist kein Bezug der dargestellten Daten zum gemessenen Zeitpunkt möglich, sodass dieser Ansatz als unzureichend anzusehen ist. Außerdem wird der Vergleich anhand der Darstellungen der Fundamentaldiagramme aus Simulation und

Empirie vorwiegend qualitativ vorgenommen.

Für die makroskopische Validierung scheint es zielführend, eine zeitlich-räumliche Darstellung der Kenngrößen zu wählen. Hierbei soll sowohl die jeweilige Verkehrsstärke q, als auch die jeweilige mittlere lokale Geschwindigkeit $\bar{v}_l$ berücksichtigt werden.

Eine mögliche grafische Darstellung mit zeitlich-räumlicher Struktur von Verkehrsstärke und mittlerer lokaler Geschwindigkeit aus empirischen Messdaten zeigt Abbildung 10.3. Die Abbildung basiert auf den Messdaten von den in Abbildung 7.9 dargestellten Messquerschnitten.

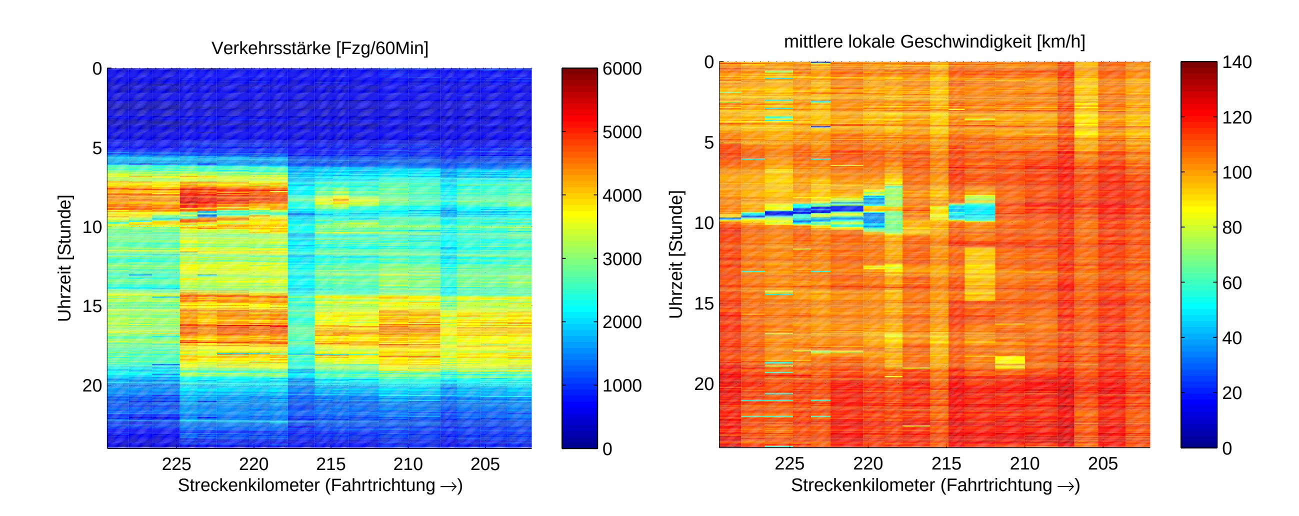
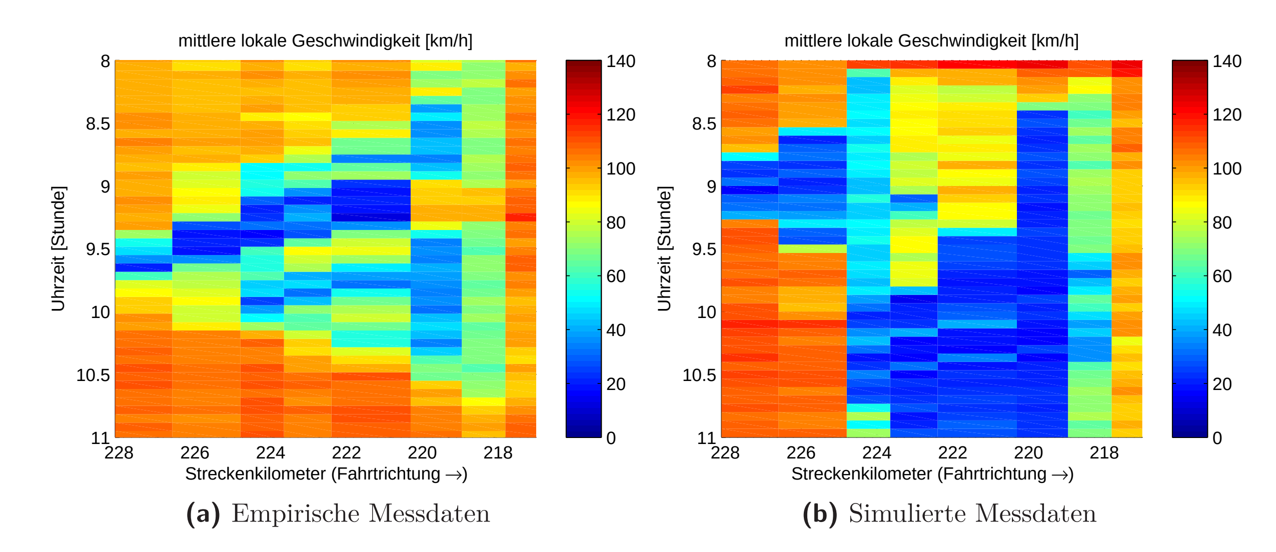


Abbildung 10.3: Grafische Darstellung der Verkehrsstärke und mittlerer lokaler Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt Hannover-Langenhagen (km 225,6) bis Lehrte Ost (km 204,4) am 11.11.09

Die Abbildung 10.4a zeigt einen Ausschnitt der obigen Darstellung der mittleren Geschwindigkeit für den Zeitraum von 8 bis 11 Uhr. Es ist zu erkennen, dass ein Stau gegen 8.30 Uhr ca. bei km 219 entsteht und sich langsam bis km 228 um ca. 9.45 Uhr ausbreitet. Die Analyse der Messdaten ergab, dass ursächlich hierfür die große Anzahl an ausfahrenden Fahrzeugen bei Hannover-Lahe auf den Messeschnellweg war. Eine vergleichbare Darstellung der mittleren Geschwindigkeit ergibt sich auch bei Betrachtung der weiteren Tage dieser Woche. Es kann davon ausgegangen werden, dass die große Anzahl an ausfahrenden Fahrzeugen durch die Messe Agritechnica (8.11.-14.11.2009) mit insgesamt ca. 350 000 Besuchern verursacht wurde [Agr10].

Auffällig ist, dass für den Messquerschnitt bei km 218,96 wenige Meter vor Beginn der Ausfahrt bereits die mittlere Geschwindigkeit wieder zunimmt und der Stau sich somit bereits vor Beginn der Ausfahrt wieder auflöst. Für den 12.11.2009 sind von einer vergleichbaren Stausituation Videoaufnahmen des Versuchsfahrzeugs vorhanden. Hier ist zu erkennen, dass sich die ausfahrenden Fahrzeuge Richtung Messeschnellweg schon frühzeitig auf den Hauptfahrstreifen einordnen und kurz vor der Ausfahrt die Fahrzeuge auf den Überholfahrstreifen 1 und 2 wieder freie Fahrt Richtung Braunschweig haben.

Bei genauer Betrachtung der Abbildung 10.4a ist zu sehen, dass ca. bei km 225 bereits vor 9 Uhr und vor dem Eintreffen des stromabwärts liegenden Staus die mittlere lokale Geschwindigkeit abnimmt. Ursache hierfür ist die große Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen an der Einfahrt Hannover-Langenhagen.



(a) Empirische Messdaten

(b) Simulierte Messdaten

Abbildung 10.4: Grafische Darstellung der mittleren lokalen Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt Hannover-Langenhagen (km 225,6) bis Hannover-Lahe (km 218,2) für den Zeitraum 8 bis 11 Uhr am 11.11.09

In der Arbeit wurde nicht das vollständige Messkonzept umgesetzt, sodass nur ein Versuchsfahrzeug zur Verfügung stand und außerdem keine Messdaten der Verkehrsstärke an den Einfahrten und Ausfahrten vorlagen. Für die Durchführung einer realitätsnahen Simulation sind diese Messdaten aber zwingend erforderlich. Um die weitere Vorgehensweise trotzdem aufzeigen zu können, wurde der betrachtete Streckenabschnitt simuliert, indem für die fehlenden Messdaten Annahmen getroffen wurden (vgl. Abschnitt 8.2). Bei der Durchführung des vollständigen Messkonzepts kann auf diese Annahmen verzichtet werden. Durch die getroffenen Annahmen ist grundsätzlich nicht zu erwarten, dass eine Übereinstimmung von empirischen und simulierten Kenngrößen erreicht wird. Die Abbildung 10.4b zeigt die mittlere lokale Geschwindigkeit für eine Simulationsdurchführung für den oben genannten Strecken- und Zeitabschnitt.

Um die Unterschiede zwischen Empirie und Simulation zu verdeutlichen, kann ein Differenzbild der beiden Darstellungen für die Verkehrsstärke als auch die mittlere lokale Geschwindigkeit erstellt werden. Abbildung 10.5 zeigt das sich ergebene Differenzbild für die mittlere lokale Geschwindigkeit.

Im Differenzbild sind zwei große blaue Flächen erkennbar, in denen in der Simulation der Verkehr zu viel gestaut ist und eine rot-orange Fläche, wo der Stau aus der Empirie nicht nachgebildet wurde. Es ist zu erkennen, dass in der Simulation die auffahrenden Fahrzeuge bei Hannover-Langenhagen zu einem ausgeprägteren Stau führen als in der Empirie. Die fehlende Kalibrierung des Fahrstreifenwechselverhaltens ist sicherlich eine der Ursachen hierfür. Im Gegenzug breitet sich der Stau von Hannover-Lahe nicht bis Hannover-Langenhagen aus, bleibt dafür aber bis zum Ende der Simulation um 11 Uhr bestehen. Die Problematik der Abbildung der vorliegenden Strecke an der Ausfahrt Hannover-Lahe, die Ursache hierfür sein kann, wurde in Abschnitt 8.2 dargestellt. Positiv hervorzuheben an der Simulation ist, dass der Verkehr sich wie in der Empirie nicht direkt an der Ausfahrt Hannover-Lahe, sondern ebenfalls erst weiter stromaufwärts staut.

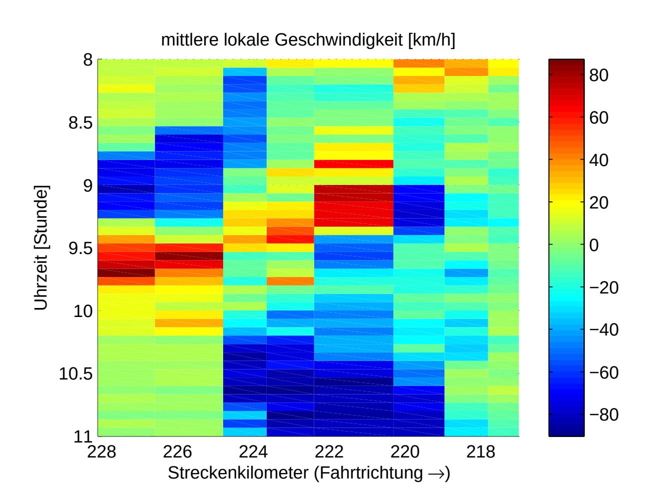


Abbildung 10.5: Differenzbild der mittleren lokalen Geschwindigkeit von Empirie und Simulation für den Streckenabschnitt Hannover-Langenhagen (km 225,6) bis Hannover-Lahe (km 218,2) für den Zeitraum 8 bis 11 Uhr am 11.11.09

Ergänzend zur grafischen Darstellung kann auch ein quantitatives Fehlermaß berechnet werden. Denkbar wäre die Verwendung des MAPE oder RMSPE (siehe Abschnitt 9.1), in denen die Differenzwerte über Ort und Zeit berücksichtigt werden.

Ein in der vorgestellten Vorgehensweise nicht berücksichtigter Aspekt ist die Auswirkung des Verkehrszustands auf die Anzahl der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge. In der Simulation werden der prozentuale Anteil der ausfahrenden Fahrzeuge sowie die Anzahl der einfahrenden Fahrzeuge in Abhängigkeit der Uhrzeit fest vorgegeben. Kommt es in der Simulation entlang der Strecke zu einem Stau, der in der Empirie nicht beobachtet wurde, kann sich eine große Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen ggf. noch verstärkend auf die Abweichung zwischen Empirie und Simulation auswirken.

10.3 Fahrstreifenaufteilung

Im vorherigen Abschnitt wurden die Verkehrsstärke und die mittlere lokale Geschwindigkeit aggregiert für alle Fahrstreifen betrachtet. Zu einer fahrstreifengenauen Validierung kann in einem folgenden Schritt die Fahrstreifenaufteilung betrachtet werden.

Abbildung 10.6 zeigt die Verkehrsstärke nach Fahrstreifen und Fahrzeugklasse Pkw und Lkw separiert für die empirischen Messdaten für den Messquerschnitt bei km 226,6 vom 11.11.2009. Eine vergleichbare Darstellung ergibt sich auch an den anderen Messquerschnitten und Tagen. In der Abbildung ist zu erkennen, dass für den Zeitraum zwischen 7 und 18 Uhr die Verkehrsstärke auf dem Hauptfahrstreifen und dem Überholfahrstreifen 1 im Vergleich zur Verkehrsstärke auf dem Überholfahrstreifen 2 annähernd konstant ist. Daher wurde eine weitere Darstellung erzeugt, die den Anteil der Verkehrsstärke je Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke zeigt (Abbildung 10.7). Zur Reduktion der darzustellenden Datenpunkte wurden dabei auf Stundenwerte hochgerechnete aggregierte Messwerte von 10 Minuten Intervallen anstelle von 1 Minuten Intervallen verwendet.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei geringer Verkehrsstärke vorwiegend der Hauptfahrstreifen und außerdem der Überholfahrstreifen 1 genutzt wird. Mit zunehmender

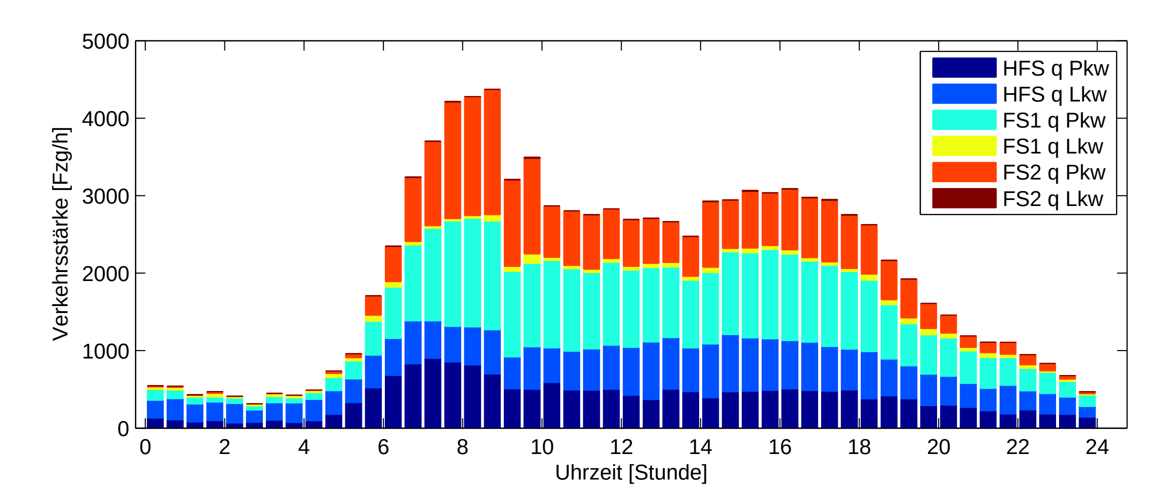


Abbildung 10.6: Verkehrsstärke nach Fahrstreifen und Fahrzeugklasse für den Messquerschnitt bei km 226,6 vor Hannover-Langenhagen (km 225,6) am 11.11.09 (HFS=Hauptfahrstreifen, FS1 = Überholfahrstreifen 1, FS2 = Überholfahrstreifen 2)

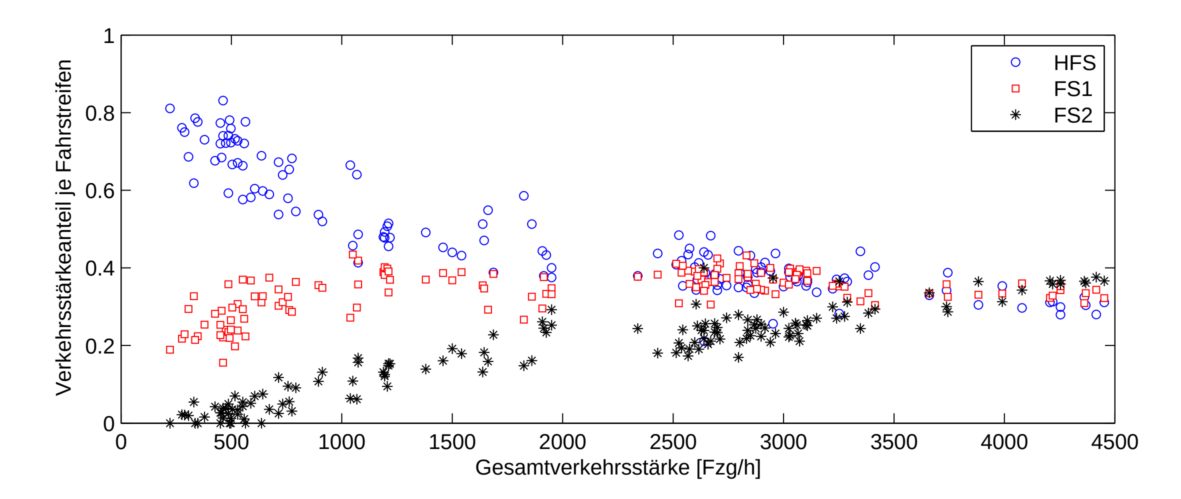
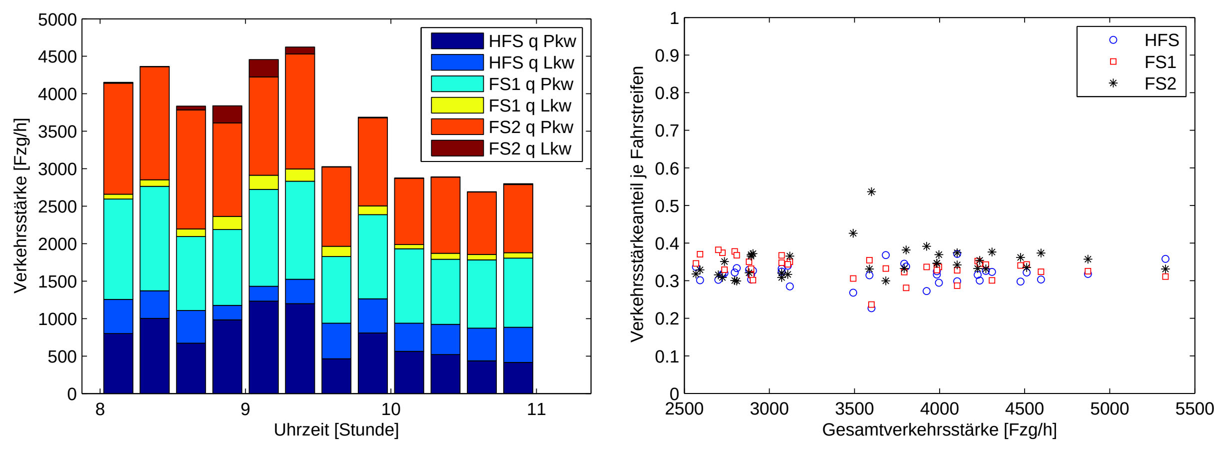


Abbildung 10.7: Verkehrsstärkeanteil je Fahrstreifen für den Messquerschnitt bei km 226,6 vor Hannover-Langenhagen (km 225,6) am 11.11.09

Verkehrsstärke verringert sich der Anteil an Fahrzeugen auf dem Hauptfahrtstreifen und der Anteil der Fahrzeuge auf dem Überholfahrstreifen 2 nimmt zu. Erst bei 4000 und mehr Fahrzeugen sind auf allen Fahrstreifen etwa gleich viele Fahrzeuge mit der Tendenz, dass auf dem Hauptfahrstreifen der geringste Anteil vorliegt.

Bei einer mikroskopisch validierten Simulation, insbesondere auch zum Fahrstreifenwechsel, sollte sich die Fahrstreifenaufteilung in der Simulation wie in der Empirie beobachtet einstellen. In der Arbeit wurde der oben betrachtete Messquerschnitt für den Zeitraum von 8 bis 11 Uhr auch für den 11.11.2009 simuliert. Abbildung 10.8 zeigt die sich in der Simulation ergebene Verkehrsstärke nach Fahrstreifen und Fahrzeugklasse sowie den Verkehrsstärkeanteil je Fahrstreifen.

In der Abbildung 10.8b ist zu erkennen, dass für eine Gesamtverkehrsstärke von 2500 Fzg/h bis 5500 Fzg/h der Anteil der Fahrzeuge für alle Fahrstreifen etwa gleich groß ist. In der Simulation verteilen sich also die Fahrzeuge für diesen Bereich etwa gleichmä-



(a) Verkehrsstärke nach Fahrstreifen und Fahrzeugklasse

(b) Verkehrsstärkeanteil je Fahrstreifen

Abbildung 10.8: Fahrstreifenaufteilung (simuliert) für den Messquerschnitt bei km 226,6 vor Hannover-Langenhagen (km 225,6) für den Zeitraum 8 bis 11 Uhr am 11.11.09

ßig auf alle drei Fahrstreifen. Im Vergleich zur Darstellung der empirischen Messdaten in Abbildung 10.7 fahren zu viele Fahrzeuge bereits bei geringen Verkehrsstärken auf dem Fahrstreifen 2.

Weiterhin fahren um kurz vor 9 Uhr und kurz nach 9 Uhr sehr viele Lkw auf dem Fahrstreifen 2, die in den empirischen Messdaten nicht vorhanden sind. Diese beiden Erkenntnisse auf makroskopischer Betrachtungsebene zeigen die Notwendigkeit einer Kalibrierung des Fahrstreifenwechselverhaltens.

Die dargestellte Auswertung für die Fahrstreifenaufteilung kann ebenfalls für die weiteren Messquerschnitte durchgeführt werden. Neben der Betrachtung der Verkehrsstärke können auch die mittleren lokalen Geschwindigkeiten der Pkw und Lkw auf den einzelnen Fahrstreifen zwischen Simulation und Empirie verglichen werden und damit eine Aussage zur makroskopischen Validität getroffen werden.

10.4 Fahrzeiten

Die Fahrzeit wird sowohl durch das individuelle Fahrerverhalten als auch durch den Verkehrszustand beeinflusst. Die Bestimmung der empirischen Fahrzeiten als auch der Fahrezeiten aus der Simulation ist nach Abschnitt 6.5 und Abschnitt 6.7 mit dem aufgezeigten Messkonzept möglich. Für den Vergleich können die Mittelwerte und die Standardabweichungen verwendet werden.

Für die erhobenen empirischen Messdaten und die durchgeführte Simulation kann dieser Vergleich hier nicht durchgeführt werden. Aufgrund der Abhängigkeit der Fahrzeit vom Verkehrszustand ist es nicht zielführend, die Fahrzeiten des Versuchsfahrers von unterschiedlichen Tagen mit den Fahrzeiten eines Tages in der Simulation zu vergleichen. Erst bei Durchführung des vollständigen Messkonzepts mit mehreren Versuchsfahrzeugen kann der Mittelwert der empirischen Fahrzeit bestimmt werden. Anhand der Messwerte der Versuchsfahrzeuge lässt sich bei Vorgabe eines Konfidenzniveaus auch das Konfidenzintervall

für den Mittelwert und die Varianz berechnen. Umgekehrt lässt sich bei Vorgabe des gewünschten Konfidenzniveaus und der zulässigen relativen oder absoluten Abweichung die erforderliche Anzahl an Versuchsfahrzeugen berechnen [DSA04], [HSS92].

10.5 Abstandsverhalten

Der Vergleich von Untersuchungen zu den Auswirkungen von ACC-Systemen auf den Verkehrsfluss hat aufgezeigt, dass die „headway distribution“ der Fahrer im Vergleich zur „target headway“ des ACC-Systems entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse hatte (siehe Abschnitt 1.2). Daher soll im Rahmen der Validierung auf makroskopischer Ebene die Verteilung der Abstände bei empirischen Folgefahrten mit der Verteilung der Abstände von simulierten Folgefahrten verglichen werden.

Bei der Betrachtung der empirischen Folgefahrten wird wie bei der Parameteridentifikation für empirische Folgefahrten zwischen Folgefahrten des Versuchsfahrzeugs sowie Folgefahrten der dem Versuchsfahrzeug nachfolgenden Fahrzeuge unterschieden. Im ersten Fall wird dabei das Abstandsverhalten des Versuchsfahrers untersucht. Im zweiten Fall wird das Abstandsverhalten einer Vielzahl unbekannter Fahrzeugführer betrachtet.

Die Schwierigkeit bei dieser Untersuchung liegt darin, zu bewerten, aus welchem Anteil einer Folgefahrt der Abstand betrachtet werden muss, um die „headway distribution“ für den Vergleich zur „target headway“ zu bestimmen. Die „target headway“ ist der geschwindigkeitsabhängige Abstand des Systems, den das ausgestattete Fahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs einnehmen wird. Daher sollen Abschnitte der Folgefahrten, die einen Annäherungsvorgang an ein vorausfahrendes Fahrzeug beschreiben sowie einzelne Abschnitte, bei denen das Fahrverhalten durch Fahrstreifenwechsel beeinflusst wurde, nicht betrachtet werden. Für den Fahrstreifenwechsel ist dies die Phase der Abstandsvergrößerung, nachdem ein Fahrzeug vor dem betrachteten Fahrzeug eingeschert ist, als auch die Phase der Beschleunigung aufgrund eines geplanten Fahrstreifenwechsels des betrachteten Fahrzeugs.

Als Grundlage für die Auswertung wurden alle automatisch erkannten Folgefahrten von einer Mindestdauer von 25 s verwendet, die nicht bei Regen stattfanden. Die Bestimmung der unter den oben genannten Gesichtspunkten zu betrachtenden Abschnitte der Folgefahrten wurde aufgrund des hohen Aufwands einer vollautomatischen Auswertung manuell unterstützt durch eine automatische Messdatenanzeige vorgenommen.

Von den betrachteten Messdaten verbleibt nur ein geringer Anteil, der die oben genannten Gesichtspunkte erfüllt. Ein Großteil der Zeit wird dazu aufgewendet, die Geschwindigkeit und den Abstand an ein neues vorausfahrendes Fahrzeug anzupassen. Für die folgenden Auswertungen verblieben ca. 2 Stunden an Folgefahrten aus Sicht des Versuchsfahrzeugs und ca. 2,5 Stunden an Folgefahrten aus Sicht des nachfolgenden Fahrzeugs. Die Dauer der Folgefahrten aus Sicht des Versuchfahrzeugs ist kürzer, da unter anderem ein Teil der Messfahrten mit aktivem ACC-System durchgeführt wurde und diese Fahrten daher nicht betrachtet wurden. Um eine geschwindigkeitsunabhängige Beschreibung des Abstandes zu erhalten, wurde nicht der Abstand in Metern betrachtet, sondern die Nettozeitlücke in Sekunden berechnet. Bei der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass die Messungen fast ausschließlich bei gut fließendem Verkehr ausgeführt wurden. Dementsprechend wurde der Großteil der Fahrten im Geschwindigkeitsbereich zwischen 90 und 140 km/h durchgeführt. Die Abbildung 10.9 zeigt die eingehaltenen Nettozeitlücken der dem Messfahrzeug

nachfolgenden Fahrzeuge eingeteilt in Geschwindigkeitsbereiche von je 10 km/h sowie die Gesamtdauer der betrachteten Folgefahrten je Geschwindigkeitsbereich.

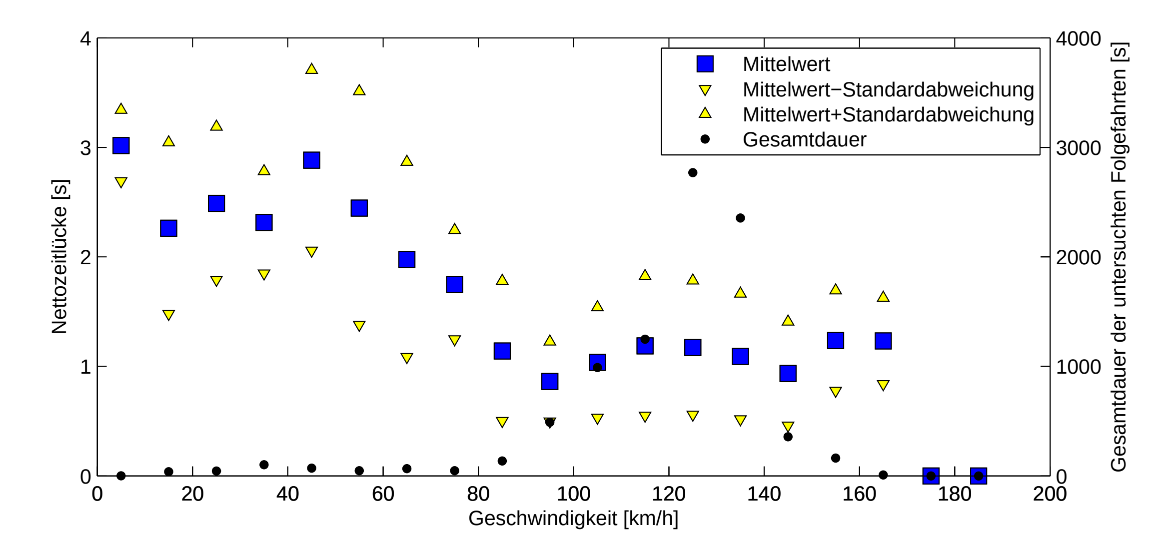


Abbildung 10.9: Nettozeitlücke und Gesamtdauer der betrachteten Folgefahrten der nachfolgenden Fahrzeuge über Geschwindigkeitsbereiche

Ergänzend zeigt Abbildung 10.10 die Häufigkeitsverteilung der Nettozeitlücken ohne Berücksichtigung der gefahrenen Geschwindigkeit.

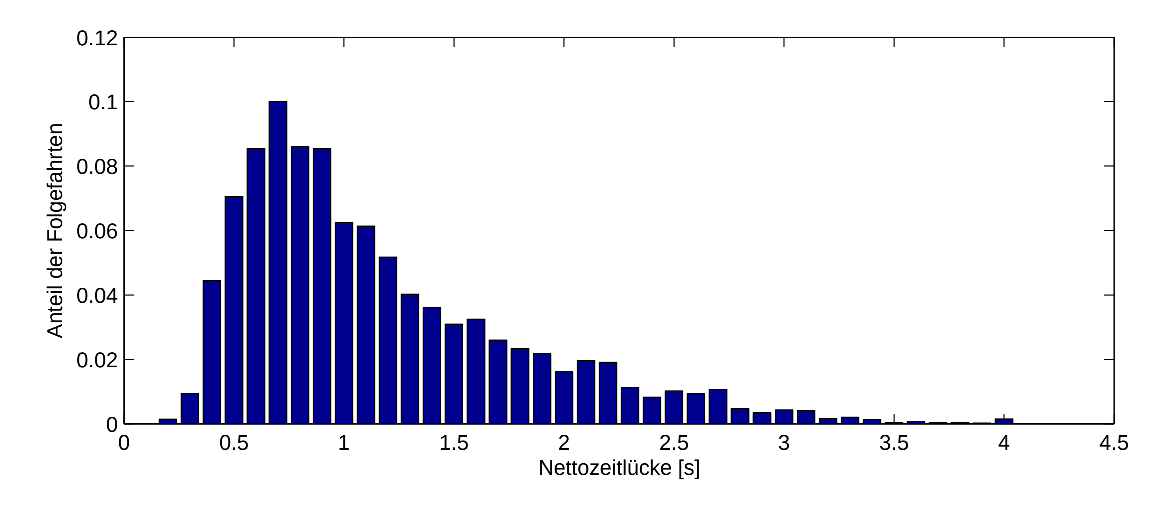


Abbildung 10.10: Häufigkeitsverteilung der Nettozeitlücken der nachfolgenden Fahrzeuge

Das Versuchsfahrzeug ermöglicht auch die Untersuchung des Abstandsverhaltens des Versuchsfahrzeugs und des Versuchsfahrers. Abbildung 10.11 zeigt die entsprechende Darstellung für die Nettozeitlücke und Gesamtdauer der Folgefahrten über verschiedene Geschwindigkeitsbereiche sowie Abbildung 10.12 für die Verteilung der Nettozeitlücken.

Es ist zu erkennen, dass der Versuchsfahrer insgesamt einen deutlich größeren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält als die nachfolgenden Fahrer zum Versuchsfahrzeug. Der Mittelwert der Nettozeitlücke liegt für Geschwindigkeiten ab 70 km/h ca. zwischen 1,5 s und 2,0 s. Der Mittelwert der Nettozeitlücke für die nachfolgenden Fahrzeuge liegt ca. zwischen 1,0 s und 1,5 s. Dieses Ergebnis zeigt deutlich den Vorteil der Untersuchung der

nachfolgenden Fahrzeuge, da eine ausschließliche Berücksichtigung des Versuchsfahrers zu einer einseitigen Sichtweise auf das Abstandsverhalten geführt hätte.

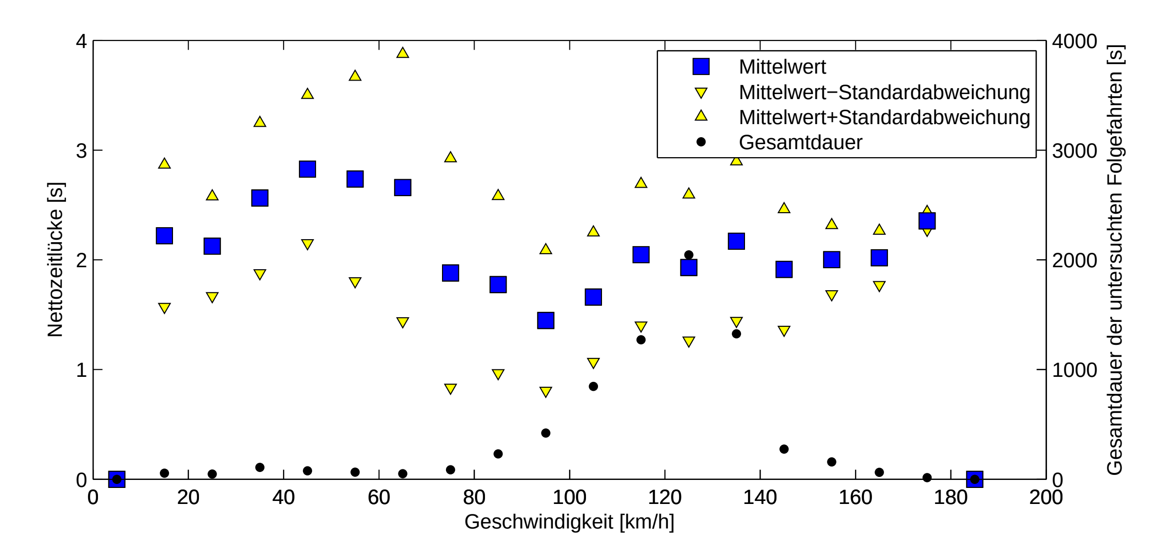


Abbildung 10.11: Nettozeitlücke und Gesamtdauer der betrachteten Folgefahrten zum vorausfahrenden Fahrzeug über Geschwindigkeitsbereiche

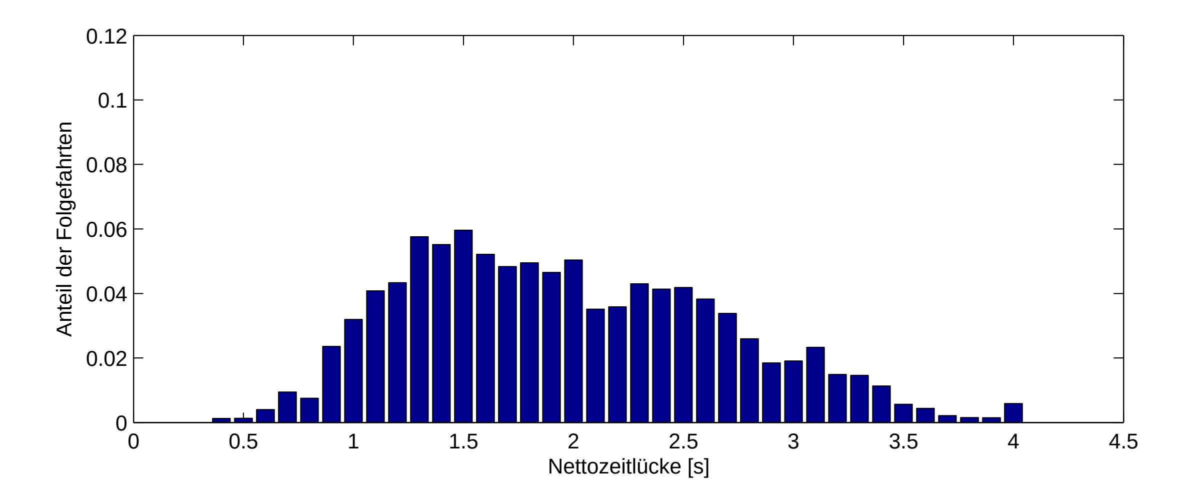


Abbildung 10.12: Häufigkeitsverteilung der Nettozeitlücken zum vorausfahrenden Fahrzeug

Die Untersuchung in der Simulation wurde für einen Streckenabschnitt der A2 bei Rehren durchgeführt, da diese Untersuchung zu einem früheren Zeitpunkt der Arbeit durchgeführt wurde. Die Wiederholung der Untersuchung für den in Abschnitt 10.2 betrachteten Strecken- und Zeitabschnitt wurde nicht durchgeführt, da die simulierten Fahrzeuge hier fast ausschließlich mit Geschwindigkeiten kleiner als 50 km/h fuhren, die oben dargestellten Nettozeitlücken aber vorwiegend für Geschwindigkeiten über 90 km/h aufgenommen wurden. Zur Beobachtung des Abstandsverhaltens wurde mithilfe der API der Simulation ein Fahrzeug mit einem virtuellen Sensor zur Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs ausgerüstet (siehe Abschnitt 8.3). Um entsprechend viele Messdaten zu erhalten, wurde die Simulation mehrmals mit unterschiedlicher „random seed“ (siehe Abschnitt 8.1) durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden für die Simulation die Standardparameter des Simulationswerkzeugs AIMSUN verwendet. Die aus der Simulation erhaltenen Nettozeitlücken sind in Abbildung 10.13 dargestellt. Die Folgefahrten wurden bei Geschwindigkeiten zwischen

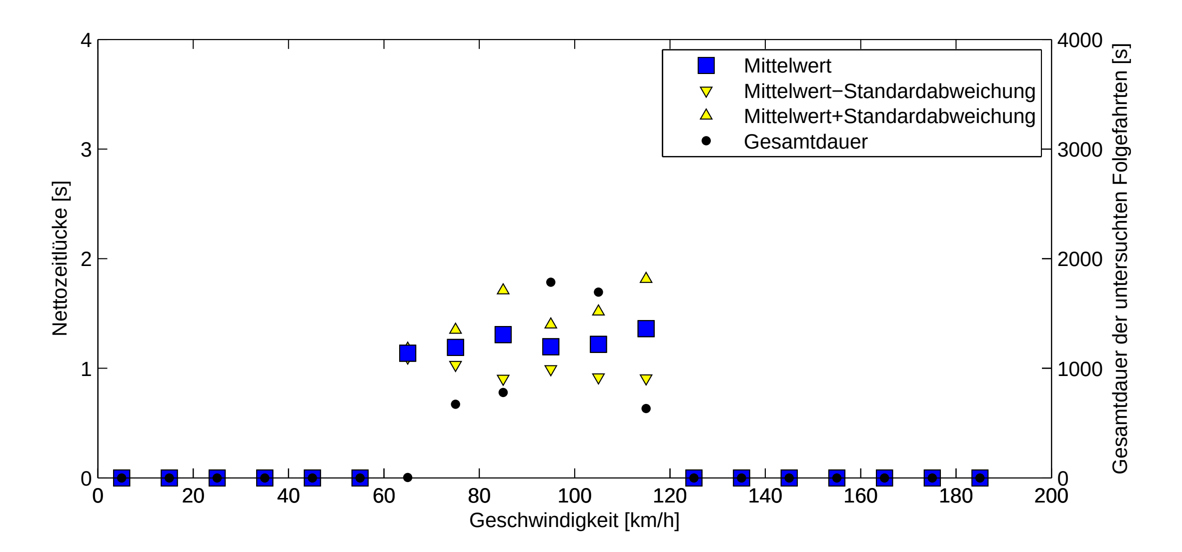


Abbildung 10.13: Nettozeitlücke und Gesamtdauer der betrachteten simulierten Folgefahrten der nachfolgenden Fahrzeuge über Geschwindigkeitsbereiche (Einstellung Standardparameter)

60 und 120 km/h aufgezeichnet. Da für das gewählte Verkehrsaufkommen des Streckenabschnitts kein Stau entstand, liegen keine Folgefahrten für den Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 60 km/h vor. Die beobachtete mittlere Nettozeitlücke der simulierten nachfolgenden Fahrzeuge ist dabei größer als die in der Empirie für die nachfolgenden Fahrzeuge beobachtete mittlere Nettozeitlücke. Auffällig ist außerdem die sehr geringe Streuung der Werte der Nettozeitlücke.

In einer zweiten Simulation wurden anstelle der Standardparameter die in Abschnitt 9.4 für die nachfolgenden Fahrzeuge identifizierten und bereits in Abschnitt 10.2 verwendeten Parameterwerte genutzt. Die erhaltenen Nettozeitlücken in der Simulation sind in Abbildung 10.14 gezeigt.

Beim Vergleich der Abbildungen ist zu erkennen, dass mit der kalibrierten Simulation auch Folgefahrten bei Geschwindigkeiten bei über 120 km/h beobachtet wurden, die bei Verwendung der Standardparameter nicht auftraten. Die Mittelwerte der Nettozeitlücken sind für mehrere Geschwindigkeitsbereiche etwas (ca. um 0,2) größer geworden, für den Geschwindigkeitsbereich von 110-120 km/h aber auch etwas kleiner (ca. um 0,1). Am auffälligsten ist aber die Zunahme der Standardabweichung für alle Geschwindigkeitsbereiche. Die eingehaltenen Abstände sind deutlich inhomogener geworden im Vergleich zur Simulation mit den Standardparametern.

Beim Vergleich der erhaltenen Nettozeitlücken aus der Empirie für die nachfolgenden Fahrzeuge (Abbildung 10.9) mit den Ergebnissen aus der Simulation ist festzustellen, dass die Verteilung der Abstände in der Simulation nicht zufriedenstellend abgebildet wird. Das Ergebnis ist deutlich besser für die kalibrierte Fahrzeugfolge im Vergleich zu den Standardparametern, trotzdem sind die empirisch beobachtbaren Abstände im Mittel noch deutlich kleiner im Vergleich zur Simulation. In der Empirie liegt der Mittelwert minus Standardabweichung für die Geschwindigkeitsbereiche von 90-150 km/h beinahe konstant

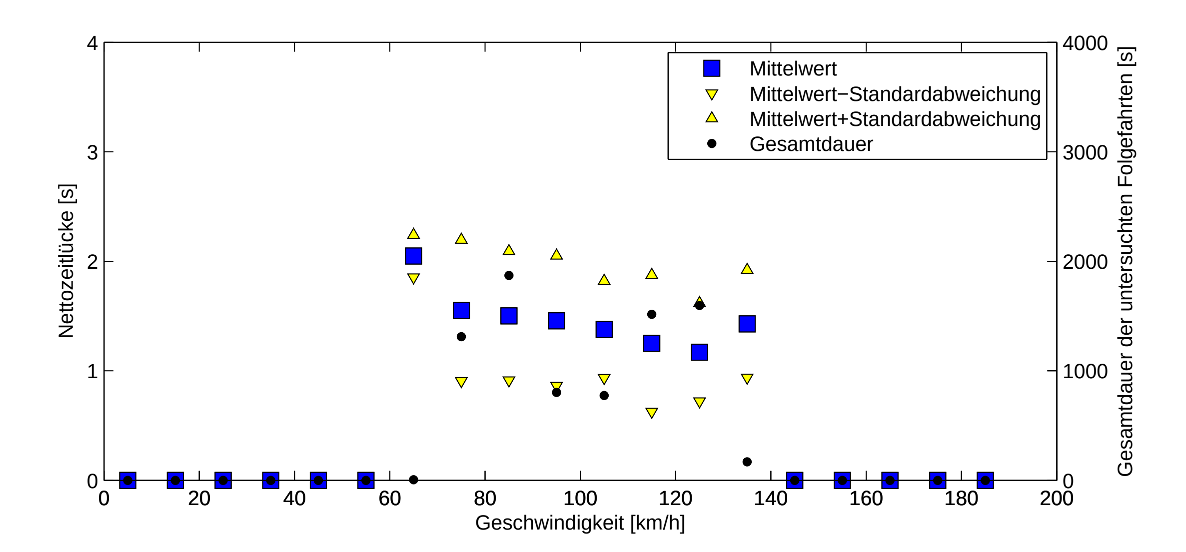


Abbildung 10.14: Nettozeitlücke und Gesamtdauer der betrachteten simulierten Folgefahrten der nachfolgenden Fahrzeuge über Geschwindigkeitsbereiche (Einstellung kalibrierte Parameter für das Fahrzeugfolgemodell)

bei 0,5 s. Die Art des verwendeten Modells von Gipps als Safe-Distance-Modell sowie die Einschränkung, dass in AIMSUN die Parameter als normalverteilt angesehen werden, sind als Ursache für diese Abweichung zu nennen.

Zur Bewertung, wie diese empirisch eingehaltenen Abstände einzuschätzen sind, soll die Auslegung der Straßenverkehrsordnung „§4 Abstand“ und der Bußgeldkatalog herangezogen werden. Nach der Rechtsprechung beträgt auf Autobahnen der nötige Abstand in der Regel etwa 1,5 s [HKD09]. Der Bußgeldkatalog sieht beispielsweise für Abstandsverstöße bei Geschwindigkeiten von mehr als 100 km/h und einem Abstand von weniger als die Hälfte des halben Tachowertes in Metern ein Bußgeld von 75 Euro und einen Punkt vor. Die weiteren Abstufungen sind weniger als 4/10, 3/10, 2/10 und 1/10 des halben Tachowertes. Bei einem Abstand von weniger als 1/10 des halben Tachowertes wird ein Bußgeld von 320 Euro, 4 Punkten und 3 Monate Fahrverbot fällig [BHJJ10]. Dabei entspricht der Hälfte des halben Tachowertes einer Nettozeitlücke von 0,9 s und 1/10 des halben Tachowerts einer Nettozeitlücke von 0,18 s. Für die nachfolgenden Fahrzeuge ergibt sich daraus, dass 45 % der beobachteten Abstände bußgeldbewährt wären, da kleiner als 0,9 s (siehe Abbildung 10.10). Für den Versuchsfahrer betrifft dies lediglich ca. 3 % der beobachteten Abstände (siehe Abbildung 10.12).

10.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zuerst eine neue Methode zur Validierung von Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens auf mikroskopischer Ebene dargestellt, die es im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise ermöglicht, auch eine größere Anzahl an Folgefahrten zu berücksichtigen. Während bislang lediglich untersucht wurde, wie sich zwei Folgefahrten relativ zueinander verhalten, erlaubt die neue Methode durch Betrachtung der Verteilung der Parameterwerte einer größeren Gesamtheit an Folgefahrten die Ableitung allgemeingültiger Aussagen. Durch die Betrachtung der Verteilung kann sowohl die Inter- als auch die Intra-driver-Variabilität berücksichtigt werden.

Zur Validierung der Modelle auf makroskopischer Ebene mit den Kenngrößen der Verkehrsstärke und mittlerer lokaler Geschwindigkeit wurde eine räumlich-zeitliche Darstellung gewählt, die im Vergleich zur Darstellung im Fundamentaldiagramm die zeitliche und räumliche Entwicklung des Verkehrs berücksichtigt. Für einen visuellen Vergleich zwischen Simulation und Empirie wurde ein Differenzbild eingeführt, das auch zur quantitativen Bewertung mit den bekannten Fehlermaßen verwendet werden kann. Exemplarisch wurde der Zeitraum von 8 bis 11 Uhr vom 11.11.2009 für den Streckenabschnitt Hannover-Langenhagen bis Hannover-Lahe in der Simulation nachgebildet. Das Differenzbild zeigt dabei, dass die empirisch beobachtete mittlere lokale Geschwindigkeit nur teilweise abgebildet werden kann. Ursache hierfür können die fehlende Kalibrierung des Fahrstreifenwechselverhaltens und die fehlenden Messdaten der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge sein, sodass hierfür die Standardparameter bzw. Annahmen getroffen werden mussten. Bei Durchführung des vollständigen Messkonzepts wären diese Annahmen nicht notwendig.

Es wurde erkannt, dass es täglich während der Messe Agritechnica auf der Autobahn A2 in Fahrtrichtung Berlin an der Ausfahrt Hannover-Lahe in Richtung Messeschnellweg zum Stau kam. Wenn diese Staubildung auch für die anderen großen Messen wie die Cebit oder die Hannover Messe beobachtbar ist, ergibt sich für die Durchführung des vollständigen Messkonzepts die Möglichkeit gezielt an einen vorhersagbaren Stau teilzunehmen. Beim Einsatz von mehreren Versuchsfahrzeugen kann durch Vorgabe unterschiedlicher Routenziele sowohl Richtung Braunschweig als auch Richtung Messe das unterschiedliche Verhalten der Fahrzeugführer an diesem Knotenpunkt untersucht werden.

Die Validierung anhand der Fahrstreifenaufteilung lieferte die Erkenntnis, dass die Simulation mit den gewählten Parameterwerten bei einer Verkehrsstärke von mehr als 2500 Fzg/h diese annähernd zu gleichen Anteilen auf die drei Fahrstreifen verteilt, was in der Empirie erst bei deutlich höheren Werten der Verkehrsstärke beobachtbar war. Außerdem fuhr in der Simulation im Vergleich zur Empirie ein zu großer Anteil an Lkws auf dem zweiten Überholfahrstreifen.

Grundsätzlich eignet sich das vorgestellte Messkonzept mit dem Einsatz mehrerer Versuchsfahrzeuge ebenfalls zur Bestimmung der Werte von Mittelwert und Standardabweichung der Fahrzeiten, um diese Werte mit den simulierten Werten zu vergleichen. Da im Rahmen der Arbeit nur ein Versuchsfahrzeug eingesetzt wurde, konnte der Vergleich in der Arbeit nicht durchgeführt werden.

Abschließend wurde das Abstandsverhalten auf makroskopischer Ebene durch eine aggregierte Betrachtung der eingehaltenen Nettozeitlücken untersucht. Sowohl für den Versuchsfahrer als auch für die nachfolgenden Fahrzeugführer konnte eine Inter- bzw. Intra-driver-Variabilität in den eingehaltenen Abständen festgestellt werden. Die eingehaltenen Nettozeitlücken der nachfolgenden Fahrzeuge waren dabei deutlich geringer als die Netto-

zeitlücken des Versuchsfahrers. Eine Beeinflussung des Versuchsfahrers durch die Kenntnis an der Teilnahme dieser Untersuchung, die als Hawthorne-Effekt bekannt ist, kann eine Ursache hierfür sein. Aus Sicht der Straßenverkehrsordnung und des Bußgeldkatalogs fuhr der Versuchsfahrer vorbildlich, wohingegen ca. 45 % der beobachteten Nettozeitlücken der nachfolgenden Fahrzeuge zu einem Bußgeld geführt hätten.

Zusammenfassend werden die oben genannten Betrachtungen bei Durchführung des vollständigen Messkonzepts eine Bewertung der Abbildungsgenauigkeit auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene erlauben. Bei Abweichungen auf mikroskopischer Ebene sind die ermittelten Parameterwerte und die Modellannahmen zu überprüfen. Bei Abweichungen auf makroskopischer Ebene an ausgezeichneten Orten ist zu kontrollieren, ob eine Anpassung über lokale Parameter notwendig ist. Bei weiterreichenden Abweichungen auf makroskopischer Ebene sind die Modellannahmen, insbesondere die Verknüpfung der Teilmodelle, zu untersuchen.

11 Gewonnene Erkenntnisse, Bewertung und weiterer Forschungsbedarf

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 11.1 die gewonnenen Erkenntnisse und deren Bewertung zusammengefasst sowie der sich daraus ergebene weitere Forschungsbedarf in Abschnitt 11.2 ermittelt.

11.1 Gewonnene Erkenntnisse und Bewertung

In der Einführung zu den Kenngrößen des Verkehrs wurde die Problematik der Begriffsdefinitionen für „mikroskopisch“, „makroskopisch“ und „Verkehrsfluss“ beschrieben. Es wurden das Fundamentaldiagramm vorgestellt und mehrere Nachteile dieser Darstellung identifiziert. So beruht die Darstellung auf der Annahme eines stationären Verkehrsflusses, der nur für den freien Verkehr als gegeben angesehen werden kann. Weiterhin kann mit den in dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [Mar99] spezifizierten Messdaten nicht ohne weitere Annahmen das Fundamentaldiagramm erstellt werden. Da in der Darstellung der zeitliche Bezug der Messdaten nicht eingeht, hat sie bei der Verwendung zur Validierung von Simulationsmodellen auf makroskopischer Ebene nur eingeschränkte Aussagekraft.

Die Analyse des Standes der Wissenschaft hat gezeigt, dass bisherige Untersuchungen zu VAS nur als „proof of concept“ durchgeführt wurden und die Aussagekraft der quantitativen Simulationsergebnisse von den Autoren selbst eingeschränkt wurde. Der Vergleich von Untersuchungen von herkömmlichen ACC-Systemen hat ein sehr heterogenes Bild der möglichen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss aufgezeigt. Diese Erkenntnisse zeigen die Notwendigkeit eines methodischen Vorgehens auf, um zukünftig eine Bewertung der Auswirkungen von VAS auf den Verkehrsfluss mit einem hohen Grad an Vertrauen in die Ergebnisse zu ermöglichen.

Daher wurden in der Arbeit die Anforderungen zur Untersuchung von VAS ermittelt. Mithilfe eines generischen Systemmodells konnte identifiziert werden, dass nur mikroskopische Parameter als unabhängig anzusehen sind. Dabei beeinflussen die Parameter auf mikroskopischer Ebene direkt das Verhalten einer einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheit. Interagieren mehrere autonome Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, resultiert hieraus das emergente Verhalten, das auf makroskopischer Ebene durch entsprechende Größen und Werte beschrieben werden kann. Makroskopische Größen können damit nur indirekt beeinflusst werden und sind folglich abhängige Größen. Es wurde belegt, dass die Untersuchung eines VAS die Berücksichtigung der mikroskopischen und makroskopischen Ebene in Verkehrssimulationsmodellen während der Kalibrierung und Validierung erfordert.

Bisherige Ansätze der Kalibrierung und Validierung können in drei Ansätze unterschieden werden. Im Ansatz I erfolgt eine Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells mit empirischen mikroskopischen Daten. Dabei finden keine Berücksichtigung makroskopischer Verkehrsgrößen und damit keine Validierung des Modells auf makroskopischer Ebene statt. Aus der Validation eines Subsystems des Gesamtmodells kann aber nicht automatisch auf ein valides Modell auf höherer (makroskopischer) Modellebene geschlossen werden. Andererseits darf in Ansatz II durch die Validation des Modells auf makroskopischer Ebene mit empirischen makroskopischen Daten nicht auf die Validität der einzelnen Submodelle auf mikroskopische Ebene geschlossen werden. Im Ansatz III erfolgt eine Kalibrierung und Validierung eines mikroskopischen Simulationsmodells mit empirischen mikroskopischen und makroskopischen Daten. Der Ansatz III erfüllt in den Grundzügen die Anforderungen zur Untersuchung von VAS, wobei eine Validierung auf mikroskopischer Ebene nicht beschrieben ist. Die bisherigen Ansätze kommen zum Teil nicht über den Konzeptstatus hinaus, da die notwendigen Messdaten zur Durchführung des Konzepts nicht vorlagen. Viele Anwender müssen daher die Daten nutzen, die sie früher selbst in einem anderen Kontext erhoben haben oder ihnen von einer anderen Stelle zur Verfügung gestellt werden. Dies hat zur Folge, dass Messdaten aus unterschiedlichsten Untersuchungen herangezogen werden. Da Messdaten - insbesondere der mikroskopischen Ebene - fehlen, werden auch Teile von Untersuchungen ausgelassen. Die bisherigen Ansätze lassen offen, ob mit den bislang verwendeten Modellen eine Übereinstimmung auf zwei Ebenen zu erreichen ist oder ob diese Modelle in dieser Hinsicht wichtige Aspekte vernachlässigen. Um die Eignung oder Nicht-Eignung bisheriger Modelle zur Untersuchung von VAS zu belegen, ist es zwingend notwendig, die erforderlichen Messdaten zu erheben, die die oben genannten Ansätze bisher nicht angegangen sind.

Der Vergleich von unterschiedlichen Methoden zur Erfassung von mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten hat ergeben, dass die Erhebung mit Versuchsfahrzeugen, die mit entsprechender Sensorik ausgestattet sind, für den vorliegenden Anwendungsfall zielführend ist. Durch den Einsatz von mehreren Versuchsfahrzeugen zur gleichen Zeit auf einem vorgegebenen Streckenabschnitt mit gleichzeitiger Datenerhebung durch eine Verkehrsrechnerzentrale und zusätzlicher lokaler Sensorik können auf dem Streckenabschnitt sowohl der Verkehrsablauf auf mikroskopischer als auch der Verkehrsfluss auf makroskopischer Ebene gleichzeitig erfasst werden. Diese Datenerhebung würde eine neue Datenbasis bislang nicht erreichten Ausmaßes generieren.

Die durchgeführte Optimierung der Parameter des Gipps-Fahrzeugfolgemodells für die im Rahmen der Arbeit erhobenen Fahrzeugfolgedaten zeigte, dass durch die Kalibrierung eine deutliche Verbesserung der Abbildung des Fahrzeugfolgeverhaltens im Vergleich zur Verwendung der Standardparameter erreicht werden konnte. Die von AIMSUN vorgesehene Normalverteilung für die Parameterwerte konnte nicht bestätigt werden. Insbesondere die Parameterwerte für b, die die maximale Wunschverzögerung des Fahrers beschreiben, konnten eine Inter- als auch Intra-driver-Variabilität sowie die Notwendigkeit einer geschwindigkeitsabhängigen Parametrierung aufzeigen. Die Abbildung einer Intra-driver-Variabilität und eine geschwindigkeitsabhängige Parametrierung sind in AIMSUN zurzeit nicht möglich.

Tabelle 11.1 zeigt eine Zusammenstellung der in dieser Arbeit betrachteten Veröffentlichungen, in denen die Erhebung mikroskopischer Einzelfahrzeugdaten detailliert beschrie-

ben ist. Während in bisherigen Arbeiten zur Kalibrierung und Validierung häufig innerstädtische Folgefahrten oder Fahrten auf speziellen Testgeländen von mehreren Minuten Dauer in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 0-60 km/h mit mehreren Stopps und damit verbundenen Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgängen betrachtet wurden, konnte in der Arbeit gezeigt werden, dass die Parameterwerte für das Gipps-Fahrzeugfolgemodell auch für Folgefahrten auf Autobahnen mit einer Dauer von minimal einer Minute bei Geschwindigkeiten bis ca. 140 km/h bestimmt werden konnten.

Tabelle 11.1: Übersicht über Veröffentlichungen, in denen die Erhebung mikroskopischer Einzelfahrzeugdaten beschrieben ist und Vergleich zur eigenen Datenerhebung

Quelle	Datenerhebung													Anwendung		
			Verfahren				Streckenart									
	Jahr	Land	GPS (DGPS/RTK GPS)	Radar (v=vorne, h=hinten)	Lidar (v=vorne, h=hinten)	Video (Draufsicht)	Rundkurs	Stadt	Außerorts	Autobahn	Umfang (FF=Folgefahrten)	Anzahl Versuchsfahrzeuge	max. Geschwindigkeit [km/h]	Kalibrierung/Validierung	Untersuchung Fahrerverhalten	Untersuchung Qualität Messdaten
[Wit96]	k. A.	GER		v	h					√	k. A.	1	k. A.		√	
[BSM02]	1997	UK		h						√	109 FF	1	130		√	
[Tol03]	1983	USA				√				√	1 h;997 m	-	40	√		
[BKW04a]	2001	JAP	√				√				<4 h	9	80	√		
[HW04]	k. A.	AUS				√		√			4 h;100 m	-	k. A.		√	
[HW04]	k. A.	AUS	√					√			1,2 h	2	80		√	
[HW04]	k. A.	GER		v+h						√	2 h	1	90		√	
[RNA04]	k. A.	JAP	√				√				56,4 km	10	90	√		
[PS05]	2002/03	ITA	√					√	√		5 FF	4	70	√		
[Har07]	2002	GER			v+h					√	800 km	1	k. A.	√		
[Kes08]	1995	GER		v				√			3 FF	1	60	√		
[PBC10]	2005/06	USA				√				√	2,5 h;640 m	-	k. A.			√
Detering	2009	GER		v	h			(√)		√	164 FF; >3000 km	1	140	√		

Auch nach der Optimierung der Parameterwerte für das Gipps-Fahrzeugfolgemodell verblieben trotz der deutlichen Verbesserung nicht zu vernachlässigende Fehler bei der Abbildung des Verlaufs von Geschwindigkeit und Abstand des nachfolgenden Fahrzeugs. Ursächlich hierfür können folgende Modellannahmen sein [Pap06], die auch einer Vielzahl von anderen Fahrzeugfolgemodellen zugrunde liegen.

- Der Fahrer ist in den Modellen in der Lage die Geschwindigkeitsdifferenz und den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug genau zu bestimmen. In vielen Modellen werden die empirisch beobachtbaren following-Schleifen nicht abgebildet.

- Der Fahrer passt seine Geschwindigkeit stets in festen Zeitschritten (Simulationsschrittweite) dem vorausfahrenden Fahrzeug an. Eine Ablenkung des Fahrers, z. B. durch die Bedienung von Radio oder Navigationssystem, oder eine Veränderung der Aufmerksamkeit während der Fahrt wird nicht berücksichtigt.

- Der Fahrer berücksichtigt bei der Wahl seiner Fahrzeuggeschwindigkeit ausschließlich das Verhalten des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs. Weitere vorausfahrende Fahr-

zeuge oder das Verhalten der Fahrzeuge auf den Nachbarfahrstreifen werden dabei nicht betrachtet.

- Bei geplanten Fahrstreifenwechseln passt der Fahrer in der Realität seine Geschwindigkeit nicht nur an das vorausfahrende Fahrzeug an, sondern ebenfalls an die Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen. Nur in wenigen Modellen werden bei der Modellierung der Längsdynamik geplante Fahrstreifenwechsel berücksichtigt.

Bei der Modellbildung besteht zusätzlich zu diesen Modellannahmen die Schwierigkeit, das empirisch beobachte Verhalten nicht nur in einem mathematischen Modell abzubilden, sondern dabei auch Parameter zu verwenden, die Eigenschaften, Merkmale und Größen des Fahrers oder des Fahrzeugs in einem realistischen Wertebereich beschreiben.

Eine Literaturrecherche und die Diskussion mit anderen Wissenschaftlern brachte die Erkenntnis, dass eine Kalibrierung auf mikroskopischer Ebene bislang nur das Fahrzeugfolgeverhalten und nicht das Fahrstreifenwechselverhalten erfasst. Sowohl die Erfassung geeigneter Kenngrößen als auch die Kalibrierung von Fahrstreifenwechselmodellen ist ein noch wenig bearbeitetes Forschungsgebiet und bietet Potential für zukünftige Forschungsarbeiten.

Bei der Durchführung der Validierung des Gipps-Fahrzeugfolgemodells wurde eine neue Methode zur Validierung von Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens auf mikroskopischer Ebene dargestellt, die es im Gegensatz zur bisherigen Vorgehensweise ermöglicht, auch eine größere Anzahl an Folgefahrten zu berücksichtigen. Während bislang lediglich untersucht wurde, wie sich zwei Folgefahrten relativ zueinander verhalten, erlaubt die neue Methode durch Betrachtung der Verteilung der Parameterwerte einer größeren Gesamtheit an Folgefahrten die Ableitung allgemeingültiger Aussagen. Durch die Betrachtung der Verteilungen kann sowohl die Inter- als auch die Intra-driver-Variabilität berücksichtigt werden.

Bei der aggregierten Betrachtung der eingehaltenen Nettozeitlücken sowohl für den Versuchsfahrer als auch für die nachfolgenden Fahrzeugführer konnte eine Inter- bzw. Intra-driver-Variabilität festgestellt werden. Die eingehaltenen Nettozeitlücken der nachfolgenden Fahrzeuge waren dabei deutlich geringer als die Nettozeitlücken des Versuchsfahrers. Eine Beeinflussung des Versuchsfahrers durch die Kenntnis an der Teilnahme dieser Untersuchung, die als Hawthorne-Effekt bekannt ist, kann eine Ursache hierfür sein. Aus Sicht der Straßenverkehrsordnung und des Bußgeldkatalogs fuhr der Versuchsfahrer vorbildlich, wohingegen ca. 45 % der beobachteten Nettozeitlücken der nachfolgenden Fahrzeuge zu einem Bußgeld geführt hätten.

11.2 Weiterer Forschungsbedarf

Neben dem bereits oben genannten Bedarf für weitere Forschungsarbeiten zur Kalibrierung von Fahrstreifenwechselmodellen ergeben sich weitere Fragestellungen. Bei dem beschriebenen Vorgehen in dieser Arbeit wird vernachlässigt, ob es durch den Einsatz des VAS zu einem veränderten Verhalten der anderen menschlichen Fahrzeugführer kommt. In der Simulation wird weiterhin nur zwischen Fahrzeugen, die mit einem VAS ausgestattet sind, und Fahrzeugen, die vom Menschen gesteuert werden, unterschieden. Fahrzeuge, die z. B. mit Assistenzsystemen wie dem ACC-System ausgestattet sind, werden nicht weiter

berücksichtigt. Die Integration dieser beiden Aspekte könnte für zukünftige Forschungsvorhaben interessant sein.

Weiterer Forschungsbedarf wird auch für die Abbildung der Inter- und Intra-driver-Variabilität gesehen. Ansätze zur besseren Abbildung der Inter-driver-Variabilität schlagen vor, unterschiedliche Modelle in eine mikroskopische Simulation zu integrieren. Dabei werden für jedes Fahrzeug in der Simulation zuerst ein Modell und anschließend die Parameter dieses Modells nach Vorgabe entsprechender Verteilungen bestimmt [HLHZ09].

Insbesondere auf mikroskopischer Ebene fehlt es an Arbeiten zum Fahrverhalten bei besonderer Streckenführung, wie z. B. bei Reduzierung der Anzahl der Fahrstreifen und der Fahrstreifenbreite in Baustellen, oder zum Fahrverhalten in Abhängigkeit des Wettergeschehens bei Regen oder Schnee. Sind diese Vorkommnisse ursächlich für einen Stau, ist es zweckmäßig, gerade diese Situationen in der Simulation abzubilden, um eine Verbesserung durch das VAS untersuchen zu können.

Das Fahrzeugfolgeverhalten wurde bislang nur für Pkws untersucht. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich, das Fahrzeugfolgeverhalten als auch das Fahrstreifenwechselverhalten ebenfalls für Lkws zu untersuchen. Es ergibt sich weiterhin die Fragestellung, wie viele Fahrzeugklassen für eine Simulation notwendig sind, um ein unterschiedliches Verhalten der Fahrzeuge dieser Fahrzeugklassen abzubilden. Da in Verkehrsrechnerzentralen in der Regel nach Vorgabe des Merkblatts für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [Mar99] nur die zwei Fahrzeugklassen „Pkw-Ähnliche“ und „Lkw-Ähnliche“ unterschieden werden, steigt der Aufwand bei der Erfassung von mehr als diesen zwei Fahrzeugklassen durch die zusätzliche Sensorik stark an.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verkehrsaufkommen auf deutschen Autobahnen zeigt nach wie vor einen stetigen Zuwachs. Eine diesem Zuwachs entsprechende Erweiterung der Verkehrsinfrastruktur ist aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht möglich. Um Staus durch zu hohes Verkehrsaufkommen zu verhindern, findet eine Verkehrssteuerung auf Netz- und Trassenebene statt. Die Beeinflussungsmöglichkeiten sind beispielsweise eine Routenführung im Netz oder eine Geschwindigkeitsbeschränkung entlang eines Streckenabschnitts. Die Ziele dabei sind die gleichmäßige Verteilung des Verkehrsaufkommens und die Harmonisierung des Verkehrsflusses. Nachteilig an den bisherigen Systemen ist, dass deren Aufbau und deren Funktionsweise es nicht erlauben, den Verkehr entsprechend seiner Dynamik zu erfassen und zu beeinflussen.

In den letzten Jahren wurden erste vielversprechende Ansätze zur Verkehrsoptimierung auf Fahrzeugebene vorgestellt. Hierbei handelt es sich um sogenannte Verkehrsassistenzsysteme (VAS), die die Längsdynamik des Einzelfahrzeugs regeln, um den Verkehrsfluss zu optimieren. In bisherigen Arbeiten zur Untersuchung der Auswirkung sowohl dieser Systeme als auch von bereits am Markt erhältlicher ACC-Systeme auf den Verkehrsfluss wurden die Anforderungen an eine derartige Untersuchung nicht systematisch ermittelt.

Mithilfe eines generischen Systemmodells wurde in der Arbeit das makroskopische Verkehrsverhalten aus dem Zusammenwirken der individuellen Einzelsysteme heraus erklärt. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnten die Anforderungen an die Untersuchung von VAS ermittelt werden. Für die quantitative Beurteilung der Leistungsfähigkeit sind Untersuchungen mit Verkehrssimulationen notwendig. Weiterhin müssen die verwendeten Simulationsmodelle auf mikroskopischer Ebene kalibriert sowie auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene validiert werden. Hierzu wurde ein neuer Zwei-Ebenen-Ansatz zur Kalibrierung und Validierung aufgezeigt. Dieser erfordert für einen gegebenen Streckenabschnitt die gleichzeitige Erhebung von mikroskopischen und makroskopischen Kenngrößen.

In der Arbeit wurde ein Messkonzept zur Ermittlung der notwendigen Kenngrößen ausgearbeitet, die sowohl Verkehrswege- als auch Verkehrsmittelseitig erfasst werden. Dazu wurde ein Versuchsfahrzeug aufgebaut und in Versuchsfahrten im Umfang von mehr als 3000 gefahrenen Kilometern eingesetzt. Es wurde eine weitestgehend vollautomatische Auswertung der Messdaten realisiert, die die Extraktion von Folgefahrten zum vorausfahrenden Fahrzeug als auch von Folgefahrten von nachfolgenden Fahrzeugen ermöglicht. Zusätzlich wurde mit den Messdaten eines GPS-Empfängers und dem freien Kartenmaterial von OpenStreetMap ein Map-Matching realisiert, um Folgefahrten auf Autobahnen von Fahrten abseits der Autobahn unterscheiden zu können. Der Aufbau des Versuchsfahrzeugs wurde dabei so gestaltet, dass auch der gleichzeitige Einsatz mehrerer gleichartig ausgerüsteter Versuchsfahrzeuge möglich ist.

Mit den Messdaten des Versuchsfahrzeugs wurde eine Kalibrierung des Fahrzeugfolgemodells nach Gipps durchgeführt. Es wurde dabei aufgezeigt, dass sowohl für die Abbildung des Fahrverhaltens des Versuchsfahrers als auch der Fahrzeugführer der nachfolgenden Fahrzeuge eine Verteilung der Werte der Modellparameter angenommen werden muss, die

die Inter- und Intra-driver-Variabilität wiedergibt. Die Ergebnisse der Kalibrierung haben ebenfalls die Notwendigkeit einer geschwindigkeitsabhängigen Parameterwerteverteilung aufgezeigt.

Die simulative Untersuchung des VAS erfordert eine mikroskopische und makroskopische Validation der verwendeten Modelle. In der Arbeit wurden entsprechende Methoden aufgezeigt. Der neue Ansatz der mikroskopischen Validierung von Modellen des Fahrzeugfolgeverhaltens berücksichtigt dabei die Erkenntnis, dass eine bestimmte, neue Verteilung der Parameterwerte angenommen werden muss. Obwohl das ermittelte Messkonzept nicht vollständig realisiert wurde, konnten die Methoden der makroskopischen Validierung exemplarisch umgesetzt und ihre Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden.

Die sich an diese Arbeit anschließende notwendige vollständige Umsetzung des aufgezeigten Messkonzepts und die Durchführung der vorgestellten Methoden zur Kalibrierung und Validierung werden es erlauben, die Auswirkungen von VAS in Verkehrssimulationsmodellen zu untersuchen und die quantitativen Ergebnisse der Untersuchungen mit einem höheren Grad an Vertrauen zu beurteilen.

Neben der Betrachtung der Auswirkungen des VAS auf den Verkehrsfluss ergeben sich zusätzliche Fragestellungen, die den Erfolg dieser Systeme beeinflussen werden. Dieses sind die Bestimmung geeigneter Ansätze für eine Markteinführung zur Erreichung eines entsprechenden Ausstattungsgrads, die Auseinandersetzung mit der Frage nach der Akzeptanz dieser Technik durch den Fahrer, die Untersuchung der technischen Zuverlässigkeit dieser Systeme und die sich nach Unfällen ergebende Fragestellung nach der Haftung des Automobilherstellers.

Als Ausblick dieser Arbeit sind weiterhin die in Abschnitt 11.2 ermittelten notwendigen Forschungstätigkeiten zu nennen. Überdies können die bei vollständiger Umsetzung des Messkonzepts erhobenen Messdaten, die eine Datenbasis bislang nicht erreichten Ausmaßes darstellen werden, Bedeutung bei der Neu- oder Weiterentwicklung von Verkehrssimulationsmodellen erlangen. Die vorgenommene Betrachtung des mikroskopischen Einzelfahrzeugverhaltens zusammen mit dem makroskopischen Verkehrsablauf wird zu einem besseren Verständnis auf den beiden Ebenen sowie deren Zusammenhänge führen.

A Vergleich lokaler und momentaner Messungen

Der Vergleich der lokalen und momentanen Messungen wird am Beispiel der mittleren lokalen und der mittleren momentanen Geschwindigkeit aufgezeigt (nach [Höf06]). Für die Betrachtung sei ein Rundkurs, wie er in Abbildung A.1 dargestellt ist, mit vier Fahrzeugen angenommen. Der Rundkurs habe eine Länge von 1 km und vier Fahrzeuge fahren mit kostanten Geschwindigkeiten von 10 km/h (Fzg. 1), 20 km/h (Fzg. 2), 30 km/h (Fzg. 3) bzw. 40 km/h (Fzg. 4) auf diesem Rundkurs. Der Rundkurs bietet die Möglichkeit, dass sich die Fahrzeuge überholen können.

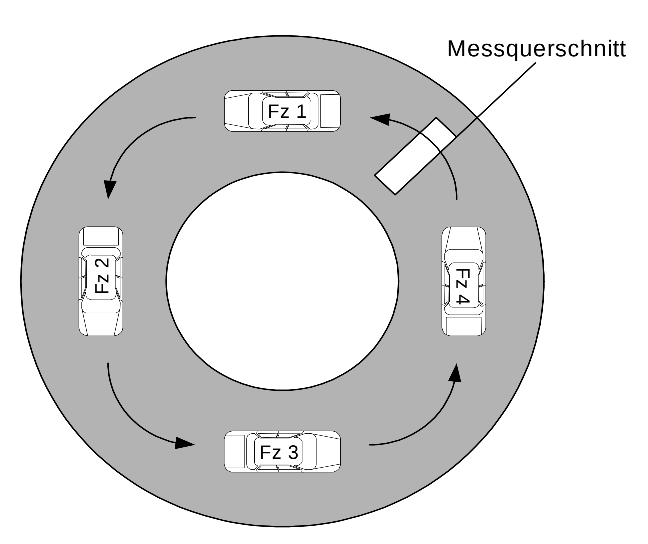


Abbildung A.1: Rundkurs mit vier Fahrzeugen

Da die Fahrzeuge mit einer konstanten Geschwindigkeit fahren, ist zu jedem Zeitpunkt die mittlere momentane Geschwindigkeit, die z. B. bei Auswertung von Luftbildaufnahmen berechnet werden kann, nach Gleichung (2.7):

$$\bar{v}_m = \frac{1}{4} \cdot (10 + 20 + 30 + 40)\, km/h = 25\, km/h \tag{A.1}$$

Außerdem kann am in Abbildung A.1 gezeigten Messquerschnitt die mittlere lokale Geschwindigkeit ermittelt werden. Bei Betrachtung über eine Zeitdauer von einer Stunde, wird das Fahrzeug 1 zehnmal, das Fahrzeug 2 zwanzigmal, das Fahrzeug 3 dreißigmal und das Fahrzeug 4 vierzigmal den Messquerschnitt überfahren. In Summe wird der Messquerschnitt damit hundertmal überfahren. Nach Gleichung (2.9) ist die mittlere lokale Geschwindigkeit:

$$\bar{v}_l = \frac{1}{100} \cdot (10 \cdot 10 + 20 \cdot 20 + 30 \cdot 30 + 40 \cdot 40)\, km/h = \frac{3000}{100}\, km/h = 30\, km/h \tag{A.2}$$

Da die schnelleren Fahrzeuge häufiger erfasst werden, ist die mittlere lokale Geschwindigkeit größer als die mittlere momentane Geschwindigkeit.

Eine Umrechnung der beiden Geschwindigkeiten ist in Abschnitt 2.3 beschrieben. Die mittlere momentane Geschwindigkeit kann auch aus der lokalen Messung nach Gleichung (2.16) berechnet werden:

$$\bar{v}_m = \frac{n}{\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{1}{v_{l(i)}}} = \frac{100}{10 \cdot \frac{1}{10} + 20 \cdot \frac{1}{20} + 30 \cdot \frac{1}{30} + 40 \cdot \frac{1}{40}} \, km/h = \frac{100}{4} \, km/h = 25 \, km/h \tag{A.3}$$

Die mittlere lokale Geschwindigkeit kann aus der momentanen Messung nach Gleichung (2.14) und Gleichung (2.15) ermittelt werden:

$$\sigma^2_{v_m} = \frac{(10-25)^2 + (20-25)^2 + (30-25)^2 + (40-25)^2}{4} \, km^2/h^2 = 125 \, km^2/h^2 \tag{A.4}$$

$$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{\sigma^2_{v_m}}{\bar{v}_m} = 25 \, km/h + \frac{125}{25} \, km/h = 30 \, km/h \tag{A.5}$$

B Übersicht Fahrzeugklassen

Tabelle B.1: Fahrzeugklassen, nach [Bun02]

<table>
<tr><th>Anzahl Klassen</th><th colspan="9">Bezeichnung der Fahrzeugklassen</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="9">Kfz</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="4">Pkw-Ähnliche</td><td colspan="5">Lkw-Ähnliche</td></tr>
<tr><td>5+1</td><td>n Kfz</td><td colspan="3">PkwG</td><td>PkwA</td><td>Lkw</td><td colspan="2">LkwK</td><td>Bus</td></tr>
<tr><td>8+1</td><td>n Kfz</td><td>Krad</td><td>Pkw</td><td>Lfw</td><td>PkwA</td><td>Lkw</td><td>LkwA</td><td>Sattel-Kfz</td><td>Bus</td></tr>
</table>

Tabelle B.2: Abkürzungsverzeichnis Fahrzeugklassen, nach [Bun02]

Kurzbezeichnung	Langbezeichnung
Kfz	Kraftfahrzeuge
n Kfz	Nicht klassifizierbare Kfz
Krad	Krafträder
Pkw	Personenkraftwagen
Lfw	Lieferwagen
PkwA	Pkw mit Anhänger
Lkw	Lastkraftwagen
LkwA	Lastkraftwagen mit Anhänger
Sattel-Kfz	Sattelfahrzeuge
Bus	Busse
PkwG	Pkw Gruppe
LkwK	Lkw Fahrzeugkombinationen

C Versuchsfahrzeug des Instituts für Fahrzeugtechnik (IfF)

Tabelle C.1: Technische Kenndaten des Versuchsfahrzeugs vom IfF

Fahrzeugtyp	VW Passat Variant 3.6 V6 FSI DSG4Motion
Nennleistung [$kW(PS)$]	184 (250)
max. Drehmoment [Nm bei $1/min$]	330 / 2750 - 3750
Hubraum [cm^3]	3168
Leergewicht [kg]	1660
Länge/Breite/Höhe [mm]	4765/1820/1472
Baujahr	2006

Bei dem Versuchsfahrzeug des Instituts für Fahrzeugtechnik handelte es sich um einen Volkswagen Passat Baujahr 2006. Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Messgrößen dieses Versuchsfahrzeugs waren größtenteils identisch mit denen des eigenen Versuchfahrzeugs. Größter Unterschied war, dass das Fahrzeug keine Sensorik für die Beobachtung des nachfolgenden Verkehrs besaß und keine Aufzeichnung der GPS-Position stattfand. Dementsprechend konnte für diese Fahrten nur das vorausfahrende Fahrzeug beobachtet werden und die automatische Auswertung der Datensätze musste teilweise manuell unterstützt werden. Es gab weiterhin Unterschiede im Umfang der aufgezeichneten fahrzeugeigenen Daten, die aber für die durchgeführten Untersuchungen nicht relevant waren.

D Kalibrierungsergebnisse

D.1 Folgefahrten des Versuchsfahrzeugs

D.1.1 Für niedrige Geschwindigkeiten (< 20 m/s)

Tabelle D.1: Identifizierte Parameter für Folgefahrten Versuchsfahrzeug (TRW) mit $v_{Versuchsfahrzeug} < 20m/s$

Folgefahrtnummer	Dateiname	Folgefahrtdauer [s]	Theil's U combined	a $[m/s^2]$	b $[m/s^2]$	V [m/s]	s [m]
1	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_185103_185431.txt	207	0.149	0.75	-0.45	16.2	1.76
2	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_185431_185550_cm.txt	79	0.194	0.91	-0.65	31.7	1.99
3	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_185550_190041.txt	291	0.159	1.75	-0.89	43.9	2.74
4	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_190041_190303.txt	142	0.124	1.11	-0.61	13.3	2.38
5	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_171803_172211.txt	248	0.138	0.65	-1.90	21.7	10.00
6	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_172211_172638_cm.txt	266	0.143	4.69	-1.06	15.8	10.00
7	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_172719_172936.txt	137	0.128	5.24	-0.96	31.4	3.16
8	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_173949_174115_cm.txt	85	0.078	1.06	-1.19	10.5	10.00
9	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_174131_174423.txt	172	0.168	0.35	-0.46	24.6	4.57
10	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_174441_174834_cm.txt	232	0.137	0.32	-0.39	27.5	0.50
11	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_175248_175422.txt	94	0.169	3.00	-1.02	19.0	7.77
12	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_175453_175554.txt	61	0.081	0.55	-1.60	44.0	10.00
13	20091124_Braunschweig_hm01_trw_mean_075307_075446_c.txt	98	0.141	0.46	-5.61	10.1	6.50
14	20091124_Braunschweig_hm01_trw_mean_075636_075752.txt	76	0.033	0.41	-1.40	16.8	1.87
15	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_164752_164941_cm.txt	109	0.142	0.25	-2.47	44.0	10.00

Tabelle D.2: Werte der Fehlermaße (Abstand) für Folgefahrten Versuchsfahrzeug (TRW) mit $v_{Versuchsfahrzeug} < 20m/s$

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m]	MPE [%]	MAE [m]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m]	std emp [m]	mean sim [m]	std sim [m]
1	207	0.07	0.004	0.85	15.02	14.64	1.14	21.34	0.086	0.94	0.004	0.079	0.920	5.8	3.3	5.9	3.0
2	79	0.12	0.020	0.97	24.12	17.95	1.36	36.38	0.110	0.90	0.008	0.098	0.903	5.4	3.2	5.5	2.7
3	291	0.12	0.006	0.92	20.81	18.01	1.14	26.73	0.101	0.87	0.010	0.005	0.987	5.1	2.3	5.2	2.2
4	142	0.05	0.004	0.65	12.17	11.38	0.85	16.01	0.068	0.93	0.003	0.001	1.001	5.7	2.3	5.8	2.4
5	248	-0.63	-0.005	5.52	15.64	15.61	7.19	19.31	0.096	0.86	0.008	0.006	0.989	35.3	13.3	34.7	13.9
6	266	-2.33	-0.017	6.41	18.15	17.55	7.46	20.47	0.099	0.89	0.097	0.246	0.659	36.5	11.0	34.2	14.7
7	137	0.12	0.008	0.92	13.07	12.84	1.25	15.96	0.077	0.94	0.009	0.001	0.995	7.2	3.7	7.3	3.8
8	85	-0.89	-0.017	3.37	9.18	7.69	4.08	11.75	0.045	0.96	0.048	0.120	0.841	43.8	13.0	42.9	14.4
9	172	1.08	0.031	2.15	25.16	14.91	3.70	63.75	0.098	0.96	0.085	0.111	0.808	14.4	10.8	15.5	12.0
10	232	0.24	0.003	2.90	14.89	13.21	3.72	20.55	0.080	0.87	0.004	0.005	0.994	22.0	7.1	22.2	7.3
11	94	0.95	0.029	5.61	25.11	23.07	6.24	28.15	0.119	0.80	0.023	0.349	0.635	24.3	10.0	25.3	6.3
12	61	-0.73	-0.017	3.47	7.00	7.08	4.44	8.67	0.044	0.94	0.027	0.012	0.973	49.1	12.5	48.3	12.1
13	98	0.71	0.024	4.09	37.31	19.48	4.89	58.87	0.099	0.93	0.021	0.031	0.955	21.0	12.0	21.7	12.8
14	76	0.24	0.005	1.00	2.41	2.17	1.24	3.18	0.013	0.99	0.038	0.017	0.954	46.3	11.4	46.5	11.2
15	109	-0.46	-0.007	7.88	20.93	19.77	9.61	25.94	0.120	-0.34	0.002	0.050	0.954	39.9	6.9	39.4	4.7

Tabelle D.3: Werte der Fehlermaße (Geschwindigkeit) für Folgefahrten Versuchsfahrzeug (TRW) mit $v_{Versuchsfahrzeug} < 20m/s$

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m/s]	MPE [%]	MAE [m/s]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m/s]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m/s]	std emp [m/s]	mean sim [m/s]	std sim [m/s]
1	207	0.01	0.004	0.15	Inf	10.79	0.22	Inf	0.063	0.97	0.005	0.030	0.968	1.4	1.0	1.4	0.9
2	79	0.06	0.038	0.21	Inf	15.03	0.30	Inf	0.084	0.96	0.042	0.000	0.967	1.4	1.1	1.5	1.1
3	291	0.03	0.006	0.12	Inf	9.50	0.20	Inf	0.058	0.98	0.023	0.000	0.979	1.3	1.1	1.3	1.1
4	142	0.01	0.005	0.14	Inf	9.31	0.20	Inf	0.056	0.98	0.006	0.012	0.987	1.5	0.9	1.5	0.9
5	248	0.01	0.000	0.74	7.55	6.90	0.97	9.68	0.042	0.97	0.000	0.000	1.003	10.7	4.3	10.8	4.3
6	266	0.07	0.003	0.55	9.04	7.59	0.68	12.21	0.044	0.97	0.011	0.005	0.987	7.2	2.8	7.3	2.8
7	137	0.03	0.008	0.18	Inf	9.36	0.26	Inf	0.051	0.99	0.015	0.016	0.974	2.0	1.6	2.0	1.7
8	85	0.00	0.000	0.48	5.47	5.49	0.59	6.84	0.033	0.96	0.000	0.000	1.008	8.8	2.2	8.8	2.2
9	172	0.08	0.015	0.29	Inf	13.06	0.41	Inf	0.069	0.98	0.040	0.063	0.901	2.2	1.9	2.3	2.0
10	232	-0.03	-0.002	0.35	8.90	8.86	0.46	11.35	0.057	0.85	0.004	0.017	0.982	4.0	0.9	3.9	0.8
11	94	0.05	0.006	0.51	8.59	8.33	0.63	10.36	0.050	0.96	0.005	0.528	0.474	6.1	1.9	6.2	1.4
12	61	-0.03	-0.003	0.75	6.63	6.02	0.95	8.44	0.037	0.95	0.001	0.243	0.768	12.5	3.0	12.5	2.5
13	98	-0.07	-0.007	0.55	Inf	7.51	0.70	Inf	0.042	0.99	0.011	0.037	0.959	7.3	4.2	7.2	4.4
14	76	0.06	0.005	0.35	3.52	2.99	0.46	5.81	0.020	0.98	0.015	0.065	0.929	11.6	2.4	11.7	2.3
15	109	-0.13	-0.005	0.54	3.49	3.45	0.69	4.47	0.022	0.95	0.033	0.192	0.781	15.6	2.0	15.5	1.7

D.1.2 Für hohe Geschwindigkeiten (> 20 m/s)

Tabelle D.4: Identifizierte Parameter für Folgefahrten Versuchsfahrzeug (TRW) mit $v_{Versuchsfahrzeug} > 20m/s$

Folgefahrtnummer	Dateiname	Folgefahrtdauer [s]	Theil's U combined	a [m/s^2]	b [m/s^2]	V [m/s]	s [m]
1	20091023_Braunschweig_hm01_trw_mean_075632_075856.txt	144	0.068	0.54	-5.04	31.3	0.50
2	20091103_Hannover_hm01_trw_mean_182149_182439_cm.txt	170	0.070	0.22	-4.05	37.8	9.23
3	20091103_Hannover_hm01_trw_mean_183205_183445_c.txt	159	0.074	0.18	-3.29	34.7	0.50
4	20091103_Hannover_hm01_trw_mean_183445_183657_cm.txt	131	0.081	0.10	-2.51	34.1	9.95
5	20091104_Hannover_hm01_trw_mean_231851_232053.txt	123	0.066	0.42	-3.64	43.6	0.90
6	20091104_Hannover_hm01_trw_mean_232411_233346.txt	575	0.065	0.10	-3.02	43.4	9.84
7	20091111_Hannover_hm01_trw_mean_221857_222115.txt	138	0.070	0.32	-2.72	43.9	0.57
8	20091111_Hannover_hm01_trw_mean_222411_222820.txt	249	0.087	6.00	-3.20	44.0	9.85
9	20091112_Braunschweig_hm01_trw_mean_083727_083943.txt	136	0.108	0.74	-2.27	44.0	4.98
10	20091112_Braunschweig_hm01_trw_mean_084306_084608.txt	182	0.082	1.57	-3.74	44.0	0.53
11	20091112_Hannover_hm01_trw_mean_190016_190221.txt	124	0.063	4.21	-4.08	37.3	10.00
12	20091117_Braunschweig_hm01_trw_mean_082507_082855_cm.txt	228	0.120	0.31	-3.59	33.2	0.51
13	20091117_Hannover_hm01_trw_mean_165533_165635.txt	63	0.024	0.43	-4.00	40.8	9.97
14	20091117_Hannover_hm01_trw_mean_170509_170652_c.txt	103	0.053	0.85	-3.63	37.1	0.56
15	20091117_Hannover_hm01_trw_mean_171242_171358_cm.txt	75	0.060	2.41	-3.78	35.7	0.51
16	20091117_Hannover_hm01_trw_mean_171517_171629.txt	72	0.056	0.69	-2.64	24.6	10.00
17	20091118_Braunschweig_hm01_trw_mean_074557_074849.txt	171	0.059	1.12	-4.13	30.3	0.50
18	20091118_Braunschweig_hm01_trw_mean_075759_075931.txt	93	0.104	0.74	-3.79	44.0	0.51
19	20091118_Braunschweig_hm01_trw_mean_081054_081205_cm.txt	70	0.063	0.33	-7.64	44.0	8.22
20	20091118_Hannover_hm01_trw_mean_213854_214116.txt	142	0.068	0.34	-3.09	38.6	10.00
21	20091118_Hannover_hm01_trw_mean_215230_215351_c.txt	80	0.082	0.10	-4.12	44.0	9.69
22	20091119_Braunschweig_hm01_trw_mean_080710_080813_c.txt	63	0.097	0.12	-5.31	44.0	10.00
23	20091119_Braunschweig_hm01_trw_mean_081204_081350.txt	106	0.109	0.18	-3.49	44.0	0.50
24	20091119_Braunschweig_hm01_trw_mean_081409_081558.txt	109	0.048	1.76	-4.37	37.1	1.31
25	20091119_Braunschweig_hm01_trw_mean_082422_082529_cm.txt	66	0.050	0.10	-3.67	38.7	0.51
26	20091119_Hannover_hm01_trw_mean_190710_190928.txt	138	0.049	0.48	-4.47	34.2	9.94
27	20091120_Braunschweig_hm01_trw_mean_071208_071346.txt	98	0.018	4.04	-2.69	37.4	0.55
28	20091120_Braunschweig_hm01_trw_mean_071418_071544.txt	86	0.093	0.75	-3.32	36.1	0.59
29	20091120_Braunschweig_hm01_trw_mean_072045_072228.txt	104	0.021	4.09	-3.06	37.2	3.85
30	20091120_Braunschweig_hm01_trw_mean_073152_073415.txt	143	0.063	0.10	-3.61	38.5	0.64
31	20091124_Braunschweig_hm01_trw_mean_075752_075902_cm.txt	69	0.100	0.74	-2.60	44.0	2.88
32	20091124_Braunschweig_hm01_trw_mean_080817_080920_c.txt	63	0.011	1.20	-2.96	37.4	9.99
33	20091124_Braunschweig_hm01_trw_mean_080923_081029_cm.txt	65	0.033	4.24	-4.44	35.5	9.97
34	20091125_Braunschweig_hm01_trw_mean_081834_082245_cm.txt	249	0.094	0.16	-3.75	44.0	8.80
35	20091125_Braunschweig_hm01_trw_mean_083629_083836.txt	127	0.094	0.13	-6.02	34.4	9.99
36	20091201_Braunschweig_hm01_trw_mean_071153_071314.txt	82	0.032	0.10	-3.30	34.4	9.99
37	20091201_Braunschweig_hm01_trw_mean_072253_072416.txt	83	0.026	3.21	-3.18	37.1	0.51
38	20091201_Hannover_hm01_trw_mean_233629_233735.txt	66	0.044	0.11	-3.55	20.6	8.81
39	20091202_Braunschweig_hm01_trw_mean_071445_071749.txt	185	0.067	2.20	-3.63	30.0	0.51
40	20091202_Braunschweig_hm01_trw_mean_071749_071911_cm.txt	80	0.057	1.30	-3.61	30.1	0.51
41	20091202_Braunschweig_hm01_trw_mean_072249_072349.txt	61	0.028	0.18	-2.11	43.7	0.50
42	20091202_Braunschweig_hm01_trw_mean_072403_072601_cm.txt	117	0.059	0.87	-4.13	37.0	0.54
43	20091202_Braunschweig_hm01_trw_mean_073239_073412.txt	93	0.073	0.16	-4.71	44.0	10.00
44	20091202_Braunschweig_hm01_trw_mean_073536_073649.txt	73	0.059	0.29	-3.81	44.0	10.00
45	20091207_Hannover_hm01_trw_mean_205439_205855.txt	257	0.074	0.12	-3.26	34.3	9.43
46	20091208_Braunschweig_hm01_trw_mean_072459_072604.txt	66	0.085	6.00	-4.30	33.5	0.50
47	20091208_Braunschweig_hm01_trw_mean_072604_072757_cm.txt	112	0.066	0.44	-4.32	34.3	10.00
48	20091209_Hannover_hm01_trw_mean_212023_212126.txt	64	0.059	6.00	-2.62	38.8	10.00
49	20091215_Braunschweig_hm01_trw_mean_075317_075502.txt	105	0.047	0.10	-4.92	26.1	0.50
50	20091216_Braunschweig_hm01_trw_mean_081625_081805.txt	100	0.033	0.84	-4.05	34.0	1.83
51	20091216_Braunschweig_hm01_trw_mean_082123_082314.txt	111	0.074	0.10	-3.25	40.0	9.60
52	20091217_Braunschweig_hm01_trw_mean_081914_082107.txt	113	0.111	6.00	-3.46	35.5	0.50
53	20091217_Braunschweig_hm01_trw_mean_082107_082219.txt	72	0.028	0.10	-2.66	36.1	8.64
54	20091217_Braunschweig_hm01_trw_mean_082557_082933.txt	216	0.076	0.19	-3.32	44.0	6.91
55	20091217_Braunschweig_hm01_trw_mean_083241_083357_c.txt	75	0.015	0.38	-3.18	36.9	9.81
56	20091217_Braunschweig_hm01_trw_mean_083828_083932.txt	64	0.063	2.56	-4.54	38.9	10.00

Identifizierte Parameter – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Dateiname	Folgefahrtdauer [s]	Theil's U combined	a [m/s^2]	b [m/s^2]	V [m/s]	s [m]
57	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_184124_184509.txt	224	0.081	0.49	-3.86	35.4	9.99
58	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_190311_191854.txt	944	0.218	4.22	-2.28	23.3	10.00
59	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_192517_192701.txt	103	0.063	1.10	-3.75	35.8	9.99
60	20091217_Hannover_hm01_trw_mean_192746_193027_cm.txt	160	0.067	0.45	-3.50	36.0	0.50
61	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_164943_165052.txt	69	0.079	2.50	-3.33	18.9	0.96
62	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_165052_170225_cm.txt	691	0.145	0.77	-2.04	27.9	3.32
63	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_170229_170636_cm.txt	245	0.076	0.50	-2.30	30.6	0.51
64	20091221_Hannover_hm01_trw_mean_170636_170920.txt	164	0.066	0.34	-4.02	28.2	7.31

Tabelle D.5: Werte der Fehlermaße (Abstand) für Folgefahrten Versuchsfahrzeug (TRW) mit $v_{Versuchsfahrzeug} > 20m/s$

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m]	MPE [%]	MAE [m]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m]	std emp [m]	mean sim [m]	std sim [m]
1	144	2.09	0.016	6.59	10.93	10.09	7.78	12.95	0.056	0.94	0.072	0.254	0.679	65.3	17.2	67.4	21.1
2	170	0.28	0.002	4.99	11.08	9.51	6.14	14.62	0.057	0.90	0.002	0.031	0.971	52.5	13.8	52.7	12.7
3	159	0.20	0.001	6.71	11.12	10.55	7.88	13.22	0.061	0.82	0.001	0.005	0.999	63.6	13.2	63.8	12.7
4	131	-0.25	-0.001	8.19	8.76	9.17	11.65	11.34	0.065	-0.15	0.000	0.515	0.490	89.2	11.0	89.0	2.6
5	123	0.30	0.004	4.08	9.64	8.53	5.48	14.12	0.057	0.61	0.003	0.347	0.656	47.8	6.9	48.1	3.7
6	575	0.60	0.001	8.32	10.23	9.46	9.83	13.02	0.055	0.86	0.004	0.169	0.829	88.0	19.3	88.6	15.2
7	138	0.43	0.003	6.46	8.29	7.88	8.81	11.52	0.053	0.81	0.002	0.139	0.864	81.9	15.1	82.3	11.8
8	249	1.01	0.003	10.61	12.69	12.26	12.91	15.68	0.073	0.45	0.006	0.177	0.820	86.6	14.2	87.6	8.8
9	136	0.08	0.001	3.80	15.38	12.41	4.89	21.77	0.072	0.95	0.000	0.096	0.909	30.6	15.0	30.7	13.5
10	182	1.58	0.010	6.86	12.44	11.74	8.56	16.92	0.069	0.88	0.034	0.009	0.961	58.4	16.9	60.0	17.7
11	124	0.05	0.001	4.39	9.09	8.42	5.70	11.44	0.053	0.93	0.000	0.028	0.978	52.2	15.1	52.2	14.1
12	228	-2.43	-0.013	10.04	18.80	17.61	12.46	22.19	0.106	0.83	0.038	0.292	0.673	57.0	21.3	54.5	14.5
13	63	0.04	0.001	1.44	3.07	3.02	1.87	3.94	0.020	0.88	0.000	0.040	0.971	47.6	3.9	47.7	3.5
14	103	0.72	0.006	5.73	10.94	7.25	6.96	16.50	0.040	0.98	0.011	0.048	0.948	79.1	34.4	79.8	32.9
15	75	0.13	0.003	3.58	7.97	7.60	4.22	9.25	0.042	0.96	0.001	0.007	1.001	47.2	15.6	47.3	15.2
16	72	-0.32	-0.006	2.74	7.82	5.24	3.77	11.75	0.033	0.98	0.007	0.007	0.996	52.3	21.7	52.0	21.4
17	171	0.26	0.003	2.86	12.46	8.47	3.82	21.05	0.048	0.98	0.005	0.025	0.974	33.7	21.0	34.0	20.3
18	93	1.48	0.031	5.31	21.04	14.74	6.89	33.75	0.091	0.82	0.046	0.304	0.657	36.0	11.4	37.5	7.6
19	70	0.15	0.004	3.33	10.46	8.67	3.88	13.86	0.048	0.96	0.001	0.013	0.995	38.4	13.2	38.5	12.7
20	142	-0.02	-0.000	7.15	10.14	8.80	9.37	14.10	0.057	0.83	0.000	0.053	0.952	81.2	16.9	81.2	14.7
21	80	-2.23	-0.021	9.41	10.05	10.09	11.43	12.12	0.061	0.74	0.038	0.161	0.809	93.3	12.1	91.0	16.7
22	63	1.33	0.043	5.22	18.03	15.06	6.35	24.96	0.087	0.91	0.044	0.634	0.333	34.6	11.7	36.0	6.6
23	106	2.25	0.026	9.47	42.03	16.43	11.45	89.01	0.087	0.96	0.039	0.506	0.462	57.6	32.9	59.9	24.7
24	109	0.34	0.005	2.93	7.36	7.15	3.51	8.95	0.042	0.84	0.009	0.045	0.953	40.9	6.5	41.3	5.8
25	66	1.03	0.023	3.02	7.45	6.20	3.90	11.00	0.039	0.95	0.070	0.614	0.326	48.7	9.0	49.7	5.9
26	138	0.07	0.001	3.46	7.51	6.24	4.48	11.00	0.040	0.92	0.000	0.043	0.962	55.4	11.6	55.5	10.7
27	98	0.04	0.000	1.98	2.22	2.06	2.36	2.75	0.012	0.99	0.000	0.008	0.999	96.4	16.7	96.4	16.4
28	86	2.02	0.024	7.48	11.85	10.76	9.65	15.58	0.066	0.90	0.044	0.027	0.937	69.6	21.3	71.6	19.7
29	104	0.26	0.002	1.73	3.04	2.19	2.50	6.16	0.015	0.99	0.011	0.090	0.906	78.8	22.1	79.0	21.4
30	143	-3.03	-0.019	7.08	8.62	8.84	8.23	9.86	0.052	0.86	0.135	0.232	0.637	80.0	14.7	77.0	10.8
31	69	0.08	0.006	1.31	9.01	8.80	2.01	11.71	0.060	0.97	0.002	0.109	0.900	14.9	7.7	15.0	7.1
32	63	0.31	0.004	0.92	1.11	1.07	1.20	1.49	0.007	0.99	0.066	0.303	0.641	86.1	7.7	86.4	7.1
33	65	0.10	0.002	2.01	4.53	4.35	2.33	5.39	0.025	0.95	0.002	0.001	1.008	46.3	7.4	46.4	7.3
34	249	0.90	0.005	7.07	16.85	14.02	8.57	22.68	0.081	0.80	0.011	0.043	0.949	50.5	14.0	51.4	12.3
35	127	0.51	0.007	6.20	17.16	15.01	7.56	20.60	0.084	0.91	0.005	0.133	0.868	41.3	18.0	41.8	15.3
36	82	-0.04	-0.000	3.70	3.94	3.71	4.39	4.94	0.022	0.95	0.000	0.307	0.702	99.7	13.3	99.7	10.9

Werte der Fehlermaße (Abstand) – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m]	MPE [%]	MAE [m]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m]	std emp [m]	mean sim [m]	std sim [m]
37	83	0.18	0.002	1.96	3.20	2.64	2.54	4.43	0.016	0.99	0.005	0.005	0.999	74.1	21.7	74.3	21.5
38	66	0.82	0.011	3.68	5.63	4.78	4.47	7.35	0.028	0.98	0.034	0.016	0.961	76.9	23.0	77.7	23.5
39	185	0.41	0.004	3.91	10.14	9.74	4.59	12.26	0.056	0.82	0.008	0.247	0.749	40.1	7.8	40.5	5.5
40	80	0.50	0.012	3.21	9.33	8.77	3.57	10.86	0.048	0.88	0.019	0.359	0.630	36.6	6.9	37.1	4.8
41	61	1.04	0.011	3.76	3.67	3.36	4.27	4.40	0.019	0.99	0.060	0.474	0.478	111.9	20.7	112.9	17.7
42	117	0.16	0.002	4.16	8.55	7.70	4.95	11.14	0.045	0.91	0.001	0.041	0.964	54.1	11.9	54.2	10.8
43	93	-0.31	-0.004	6.20	11.24	9.42	8.01	15.10	0.057	0.95	0.002	0.128	0.878	65.8	25.6	65.5	22.8
44	73	-0.08	-0.001	3.90	7.01	5.95	6.01	10.57	0.044	0.94	0.000	0.047	0.963	65.6	17.6	65.5	16.3
45	257	-1.21	-0.004	7.95	10.30	9.77	9.86	12.97	0.060	0.90	0.015	0.375	0.613	81.4	20.3	80.2	14.2
46	66	1.65	0.048	4.33	17.05	11.73	5.85	27.22	0.074	0.90	0.080	0.091	0.839	36.9	13.0	38.5	11.3
47	112	-0.08	-0.001	3.38	8.94	8.26	4.52	12.83	0.055	0.70	0.000	0.295	0.711	40.9	6.3	40.9	3.9
48	64	-0.75	-0.009	6.50	8.15	7.32	7.78	9.78	0.041	0.97	0.009	0.026	0.975	88.7	31.3	88.0	32.5
49	105	0.95	0.015	2.57	6.17	6.22	3.26	7.39	0.036	0.99	0.084	0.175	0.747	41.2	16.7	42.2	18.0
50	100	-0.07	-0.001	2.43	4.38	3.51	3.06	5.92	0.020	1.00	0.000	0.018	0.989	69.2	34.2	69.2	33.8
51	111	3.57	0.025	10.13	13.12	11.14	11.60	16.41	0.060	0.96	0.095	0.558	0.353	91.0	29.6	94.5	21.0
52	113	1.42	0.018	8.36	18.20	16.94	9.66	21.33	0.095	0.61	0.022	0.233	0.752	49.4	12.0	50.8	7.4
53	72	1.29	0.013	3.05	3.35	3.21	3.82	4.39	0.020	0.94	0.115	0.642	0.252	95.0	7.3	96.3	4.3
54	216	0.57	0.003	5.84	10.93	10.30	7.46	14.57	0.065	0.81	0.006	0.431	0.566	56.7	11.8	57.2	6.9
55	75	0.10	0.001	1.29	1.57	1.46	1.59	2.01	0.009	0.99	0.004	0.137	0.868	88.0	13.7	88.1	13.1
56	64	-0.26	-0.006	4.49	10.79	9.37	5.23	13.37	0.051	0.96	0.002	0.012	0.996	47.9	18.0	47.7	17.4
57	224	0.51	0.002	9.14	11.21	11.43	11.39	13.46	0.068	0.87	0.002	0.021	0.980	80.0	23.3	80.5	21.6
58	944	0.62	0.002	5.76	46.83	30.45	7.42	76.12	0.175	0.68	0.007	0.149	0.845	18.9	10.1	19.5	7.3
59	103	1.16	0.009	6.47	7.62	7.67	7.95	8.92	0.046	0.91	0.021	0.101	0.884	84.4	16.9	85.6	19.4
60	160	0.15	0.001	5.96	9.52	9.18	7.19	11.77	0.054	0.91	0.000	0.014	0.989	65.0	17.0	65.1	16.1
61	69	0.66	0.021	2.69	9.35	8.40	3.53	12.84	0.053	0.94	0.035	0.245	0.730	32.0	9.7	32.7	8.0
62	691	0.71	0.002	8.19	21.39	19.34	10.98	27.99	0.115	0.87	0.004	0.088	0.909	42.4	22.6	43.1	19.3
63	245	0.85	0.003	7.15	10.82	9.88	8.68	14.04	0.059	0.80	0.009	0.117	0.876	72.4	14.3	73.2	11.3
64	164	0.20	0.001	6.21	8.44	7.76	7.81	10.49	0.046	0.95	0.001	0.004	0.999	80.0	25.3	80.2	25.8

Tabelle D.6: Werte der Fehlermaße (Geschwindigkeit) für Folgefahrten Versuchsfahrzeug (TRW) mit $v_{Versuchsfahrzeug} > 20m/s$

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m/s]	MPE [%]	MAE [m/s]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m/s]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m/s]	std emp [m/s]	mean sim [m/s]	std sim [m/s]
1	144	-0.02	-0.000	0.57	1.89	1.85	0.70	2.35	0.011	0.95	0.000	0.010	0.995	30.9	2.3	30.9	2.2
2	170	-0.04	-0.001	0.66	2.09	2.10	0.82	2.61	0.013	0.90	0.003	0.055	0.947	31.4	1.9	31.4	1.7
3	159	0.05	0.001	0.73	2.22	2.23	0.87	2.62	0.013	0.83	0.003	0.213	0.788	32.8	1.5	32.9	1.1
4	131	0.32	0.006	0.70	2.39	2.30	1.00	3.50	0.016	0.77	0.105	0.557	0.343	30.6	1.3	31.0	0.6
5	123	0.04	0.001	0.52	1.51	1.50	0.68	1.97	0.010	0.84	0.003	0.224	0.779	34.7	1.2	34.8	0.9
6	575	-0.03	-0.000	0.55	1.55	1.55	0.72	1.99	0.010	0.91	0.002	0.053	0.946	35.6	1.8	35.6	1.6
7	138	-0.13	-0.002	0.88	2.55	2.53	1.17	3.39	0.017	0.75	0.012	0.079	0.914	34.7	1.8	34.6	1.4
8	249	-0.07	-0.000	0.90	2.13	2.13	1.12	2.66	0.013	0.76	0.004	0.162	0.836	42.0	1.7	41.9	1.3
9	136	-0.04	-0.002	0.77	7.16	6.07	0.97	9.65	0.036	0.98	0.002	0.080	0.924	12.6	4.8	12.6	4.6
10	182	-0.04	-0.000	0.85	2.11	2.09	1.06	2.67	0.013	0.95	0.001	0.101	0.902	40.8	3.3	40.7	2.9
11	124	0.16	0.003	0.59	1.68	1.67	0.74	2.12	0.011	0.88	0.046	0.216	0.743	35.3	1.5	35.5	1.2
12	228	-0.01	-0.000	0.74	2.36	2.35	0.85	2.73	0.014	0.84	0.000	0.080	0.923	31.3	1.6	31.2	1.3
13	63	0.05	0.002	0.22	0.65	0.66	0.29	0.86	0.004	0.81	0.031	0.295	0.685	33.3	0.5	33.4	0.3
14	103	0.11	0.002	0.71	1.96	1.96	0.93	2.57	0.013	0.69	0.015	0.120	0.872	36.2	1.3	36.3	0.9
15	75	0.09	0.003	0.97	2.93	2.90	1.15	3.47	0.017	0.90	0.006	0.001	1.002	33.3	2.6	33.4	2.5
16	72	-0.05	-0.003	0.68	4.31	3.64	0.89	5.59	0.023	0.99	0.004	0.096	0.910	18.6	5.9	18.6	5.7
17	171	0.02	0.000	0.43	1.64	1.62	0.55	2.12	0.010	0.95	0.001	0.010	0.992	26.5	1.7	26.5	1.6
18	93	-0.02	-0.001	0.61	2.01	2.03	0.81	2.62	0.013	0.95	0.001	0.156	0.851	30.2	2.5	30.2	2.2

Werte der Fehlermaße (Geschwindigkeit) – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m/s]	MPE [%]	MAE [m/s]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m/s]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m/s]	std emp [m/s]	mean sim [m/s]	std sim [m/s]
19	70	0.04	0.001	0.81	2.61	2.57	0.97	3.17	0.015	0.96	0.002	0.035	0.974	31.6	3.2	31.7	3.3
20	142	-0.03	-0.000	0.62	1.89	1.87	0.77	2.37	0.012	0.85	0.001	0.050	0.954	33.0	1.5	33.0	1.3
21	80	-0.11	-0.002	1.52	3.35	3.33	1.86	4.10	0.020	0.39	0.003	0.404	0.601	45.7	2.0	45.6	0.8
22	63	-0.20	-0.007	0.54	1.64	1.66	0.66	1.99	0.010	0.89	0.095	0.315	0.600	32.6	1.3	32.4	0.9
23	106	-0.05	-0.001	1.03	3.70	3.41	1.34	4.88	0.022	0.98	0.001	0.150	0.856	30.1	6.2	30.1	5.6
24	109	0.05	0.001	0.35	0.95	0.97	0.45	1.21	0.006	0.93	0.013	0.007	0.987	36.4	1.2	36.5	1.2
25	66	0.08	0.002	0.54	1.56	1.56	0.73	2.10	0.011	0.45	0.011	0.289	0.711	34.5	0.8	34.6	0.4
26	138	0.03	0.001	0.50	1.51	1.49	0.60	1.84	0.009	0.83	0.003	0.092	0.910	33.6	1.1	33.6	0.9
27	98	-0.05	-0.001	0.32	0.89	0.89	0.45	1.25	0.006	0.90	0.015	0.003	0.989	36.1	1.0	36.1	1.0
28	86	-0.41	-0.010	1.16	3.09	3.29	1.94	4.78	0.028	0.59	0.045	0.409	0.554	35.2	2.3	34.8	1.1
29	104	-0.01	-0.000	0.31	0.85	0.85	0.41	1.14	0.006	0.97	0.000	0.036	0.971	36.3	1.6	36.2	1.5
30	143	-0.02	-0.000	0.68	1.84	1.84	0.81	2.21	0.011	0.58	0.001	0.413	0.592	36.9	1.0	36.9	0.5
31	69	-0.12	-0.014	0.48	5.53	5.69	0.73	7.74	0.039	0.99	0.027	0.266	0.717	8.4	4.2	8.3	3.8
32	63	-0.07	-0.002	0.20	0.53	0.54	0.27	0.73	0.004	0.90	0.075	0.080	0.855	36.9	0.6	36.8	0.5
33	65	-0.04	-0.001	0.49	1.43	1.42	0.54	1.57	0.008	0.93	0.005	0.000	1.006	34.6	1.5	34.6	1.5
34	249	0.01	0.000	0.56	1.90	1.90	0.76	2.55	0.013	0.78	0.000	0.005	0.998	29.7	1.2	29.8	1.1
35	127	-0.14	-0.002	0.54	1.52	1.51	0.72	2.03	0.010	0.84	0.040	0.031	0.934	35.8	1.3	35.6	1.2
36	82	0.06	0.001	0.59	1.64	1.63	0.71	1.96	0.010	0.85	0.007	0.243	0.758	36.1	1.3	36.2	0.9
37	83	0.04	0.001	0.46	1.49	1.41	0.63	2.02	0.009	0.99	0.003	0.003	1.002	32.9	5.1	32.9	5.1
38	66	-0.02	-0.001	0.82	3.00	2.81	1.00	3.92	0.017	0.98	0.000	0.002	1.008	29.3	4.8	29.3	4.7
39	185	-0.05	-0.001	0.57	1.94	1.93	0.66	2.26	0.011	0.72	0.006	0.016	0.982	29.4	0.9	29.3	0.8
40	80	0.06	0.002	0.46	1.57	1.57	0.54	1.82	0.009	0.57	0.015	0.027	0.967	29.5	0.6	29.6	0.5
41	61	-0.07	-0.002	0.46	1.37	1.38	0.60	1.76	0.009	0.90	0.012	0.160	0.839	33.6	1.4	33.5	1.1
42	117	-0.02	-0.000	0.78	2.30	2.21	0.99	3.04	0.014	0.92	0.001	0.038	0.967	35.3	2.6	35.3	2.4
43	93	-0.24	-0.005	0.84	2.38	2.39	1.10	3.10	0.016	0.87	0.049	0.532	0.426	35.1	1.9	34.9	1.1
44	73	0.22	0.006	0.69	2.23	2.04	1.01	3.34	0.015	0.97	0.047	0.213	0.749	34.0	3.9	34.2	3.5
45	257	0.05	0.000	0.79	2.32	2.32	0.98	2.86	0.014	0.45	0.003	0.467	0.533	34.3	1.1	34.3	0.4
46	66	0.08	0.003	0.52	1.61	1.59	0.71	2.22	0.011	0.65	0.014	0.092	0.905	32.8	0.9	32.9	0.7
47	112	-0.03	-0.001	0.53	1.84	1.77	0.66	2.31	0.011	0.98	0.003	0.137	0.867	30.2	3.1	30.2	2.9
48	64	0.13	0.005	1.00	3.25	3.05	1.17	3.96	0.018	0.99	0.013	0.073	0.925	32.7	6.8	32.9	6.5
49	105	0.11	0.002	0.56	1.76	1.68	0.74	2.53	0.011	0.98	0.023	0.089	0.895	33.3	3.6	33.4	3.4
50	100	0.02	0.001	0.56	1.91	1.84	0.80	2.71	0.013	0.97	0.001	0.003	1.004	30.4	3.3	30.5	3.3
51	111	-0.03	-0.001	0.85	2.43	2.40	0.99	2.86	0.014	0.62	0.001	0.363	0.643	35.4	1.2	35.3	0.7
52	113	0.11	0.002	0.93	2.75	2.73	1.15	3.41	0.017	0.33	0.009	0.001	0.996	34.1	1.0	34.2	1.0
53	72	-0.17	-0.005	0.46	1.42	1.41	0.55	1.71	0.009	0.70	0.095	0.346	0.568	32.7	0.7	32.5	0.4
54	216	0.01	0.000	0.55	1.78	1.76	0.70	2.28	0.011	0.98	0.000	0.010	0.993	31.4	3.7	31.4	3.6
55	75	-0.02	-0.000	0.33	0.96	0.95	0.39	1.16	0.006	0.89	0.002	0.122	0.886	34.3	0.9	34.3	0.7
56	64	0.02	0.001	0.59	1.71	1.72	0.78	2.24	0.011	0.92	0.001	0.180	0.831	34.1	2.0	34.1	1.7
57	224	0.00	0.000	0.72	2.12	2.10	0.85	2.51	0.012	0.95	0.000	0.003	1.000	34.2	2.8	34.2	2.8
58	944	0.03	0.000	0.47	Inf	7.55	0.62	Inf	0.043	0.99	0.003	0.010	0.988	6.2	3.8	6.2	3.8
59	103	-0.26	-0.005	0.97	2.71	2.73	1.27	3.45	0.018	0.82	0.042	0.112	0.853	35.7	2.2	35.4	1.8
60	160	-0.03	-0.000	0.73	2.22	2.21	0.90	2.75	0.014	0.92	0.001	0.000	1.003	32.8	2.3	32.7	2.3
61	69	0.09	0.005	0.79	4.48	4.43	0.95	5.45	0.027	0.85	0.008	0.307	0.695	17.8	1.7	17.9	1.2
62	691	-0.05	-0.000	0.78	5.57	4.90	1.01	8.47	0.030	0.98	0.002	0.043	0.956	15.9	5.7	15.9	5.5
63	245	-0.06	-0.001	0.70	2.76	2.72	0.88	3.53	0.017	0.90	0.004	0.004	0.995	25.6	2.0	25.6	1.9
64	164	0.01	0.000	0.90	3.36	3.31	1.06	3.99	0.019	0.76	0.000	0.153	0.851	27.3	1.6	27.3	1.2

D.2 Folgefahrten der nachfolgenden Fahrzeuge

Tabelle D.7: Identifizierte Parameter für Folgefahrten dem Versuchsfahrzeug nachfolgende Fahrzeuge (Hella)

Folgefahrtnummer	Dateiname	Folgefahrtdauer [s]	Theil's U combined	a $[m/s^2]$	b $[m/s^2]$	V [m/s]	s [m]
1	20091023_Braunschweig_hm01_hella_mean_074825_075131_e.txt	187	0.058	0.21	-5.08	32.9	1.10
2	20091023_Hannover_hm01_hella_mean_001905_002152_e.txt	167	0.063	6.00	-5.40	35.1	9.99
3	20091026_Braunschweig_hm01_hella_mean_072302_072515_e.txt	133	0.058	0.99	-4.36	33.6	0.50
4	20091103_Hannover_hm01_hella_mean_182121_182336_e.txt	134	0.032	0.22	-3.42	33.0	9.99
5	20091112_Braunschweig_hm01_hella_mean_084428_084634_e.txt	126	0.056	1.79	-5.77	44.0	10.00
6	20091117_Braunschweig_hm01_hella_mean_082122_082343_e.txt	142	0.054	0.38	-4.37	31.2	9.97
7	20091117_Braunschweig_hm01_hella_mean_082402_082758_e.txt	237	0.070	1.58	-2.97	33.1	0.52
8	20091117_Braunschweig_hm01_hella_mean_082902_083130_e.txt	148	0.090	2.06	-7.96	33.8	0.50
9	20091117_Hannover_hm01_hella_mean_165138_165338_e.txt	121	0.043	0.36	-5.41	37.1	0.50
10	20091117_Hannover_hm01_hella_mean_170651_170822_e.txt	91	0.026	0.17	-6.65	35.7	0.50
11	20091117_Hannover_hm01_hella_mean_170826_170941_e.txt	75	0.068	1.94	-3.39	27.3	0.50
12	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_074552_074848_e.txt	176	0.057	1.25	-8.00	32.5	0.50
13	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_074925_075038_e.txt	73	0.030	0.61	-5.29	28.1	0.50
14	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_075316_075455_e.txt	99	0.025	1.20	-8.00	35.1	7.73
15	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_075636_075941_e.txt	185	0.097	1.53	-7.21	37.1	7.07
16	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_075946_080058_e.txt	72	0.032	0.34	-4.88	38.6	9.87
17	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_080751_080946_e.txt	114	0.036	6.00	-6.24	39.0	10.00
18	20091118_Braunschweig_hm01_hella_mean_081052_081427_e.txt	215	0.129	0.43	-8.00	44.0	3.01
19	20091118_Hannover_hm01_hella_mean_213620_213820_e.txt	120	0.034	3.35	-5.03	33.8	0.52
20	20091118_Hannover_hm01_hella_mean_213833_214127_e.txt	174	0.102	0.98	-4.29	34.9	9.64
21	20091119_Braunschweig_hm01_hella_mean_080312_080605_e.txt	174	0.062	0.96	-4.88	32.5	10.00
22	20091119_Braunschweig_hm01_hella_mean_080606_080710_e.txt	64	0.035	4.43	-2.69	31.0	6.19
23	20091119_Braunschweig_hm01_hella_mean_080922_081300_e.txt	218	0.026	2.13	-6.02	35.3	9.56
24	20091119_Braunschweig_hm01_hella_mean_082125_082326_e.txt	122	0.062	0.10	-8.00	43.3	7.47
25	20091119_Hannover_hm01_hella_mean_190926_191143_e.txt	137	0.051	2.75	-4.49	38.6	0.55
26	20091120_Braunschweig_hm01_hella_mean_071234_071627_e.txt	233	0.134	3.42	-3.88	41.3	0.50
27	20091120_Braunschweig_hm01_hella_mean_071827_072015_e.txt	108	0.105	0.92	-5.63	44.0	10.00
28	20091120_Braunschweig_hm01_hella_mean_072045_072250_e.txt	125	0.042	0.42	-4.53	39.0	0.55
29	20091124_Braunschweig_hm01_hella_mean_075635_075751_e.txt	76	0.050	0.29	-2.07	16.2	0.50
30	20091124_Braunschweig_hm01_hella_mean_075905_080021_e.txt	76	0.043	0.93	-6.35	38.3	0.51
31	20091124_Braunschweig_hm01_hella_mean_080124_080230_e.txt	66	0.025	1.85	-3.93	36.5	9.81
32	20091124_Braunschweig_hm01_hella_mean_080320_080421_e.txt	61	0.028	0.20	-4.79	38.5	0.52
33	20091124_Braunschweig_hm01_hella_mean_081144_081407_e.txt	143	0.087	1.24	-8.00	38.6	6.22
34	20091124_Hannover_hm01_hella_mean_182051_182229_e.txt	98	0.057	6.00	-5.39	37.7	9.92
35	20091124_Hannover_hm01_hella_mean_183350_183459_e.txt	69	0.017	3.93	-2.60	37.3	1.78
36	20091125_Braunschweig_hm01_hella_mean_081825_082106_e.txt	161	0.102	6.00	-4.11	31.3	0.50
37	20091125_Braunschweig_hm01_hella_mean_082153_082324_e.txt	91	0.077	1.75	-8.00	31.1	0.50
38	20091125_Braunschweig_hm01_hella_mean_082326_082728_e.txt	242	0.084	0.67	-5.28	44.0	5.54
39	20091125_Braunschweig_hm01_hella_mean_082819_082926_e.txt	67	0.032	0.59	-5.12	40.3	0.50
40	20091125_Braunschweig_hm01_hella_mean_083649_083850_e.txt	121	0.014	1.01	-4.30	36.9	9.53
41	20091125_Braunschweig_hm01_hella_mean_084141_084257_e.txt	77	0.057	0.96	-6.29	39.8	0.50
42	20091201_Braunschweig_hm01_hella_mean_071446_071703_e.txt	137	0.074	6.00	-5.21	43.4	10.00
43	20091201_Braunschweig_hm01_hella_mean_072106_072506_e.txt	239	0.155	0.81	-4.43	44.0	10.00
44	20091201_Braunschweig_hm01_hella_mean_073057_073248_e.txt	111	0.115	0.74	-5.81	40.3	10.00
45	20091202_Braunschweig_hm01_hella_mean_071444_071558_e.txt	74	0.087	0.23	-5.41	44.0	10.00
46	20091202_Braunschweig_hm01_hella_mean_072239_072706_e.txt	267	0.101	1.13	-7.50	41.7	10.00
47	20091207_Hannover_hm01_hella_mean_205617_205803_e.txt	106	0.078	5.99	-3.90	36.0	9.96
48	20091208_Braunschweig_hm01_hella_mean_072613_072721_e.txt	68	0.053	0.43	-8.00	38.5	1.54
49	20091209_Hannover_hm01_hella_mean_213025_213205_e.txt	101	0.047	0.10	-3.11	39.0	0.50
50	20091209_Hannover_hm01_hella_mean_213238_213348_e.txt	70	0.009	0.60	-3.70	39.4	1.69
51	20091209_Hannover_hm01_hella_mean_213414_213523_e.txt	68	0.053	6.00	-6.25	39.4	0.52
52	20091214_Hannover_hm01_hella_mean_185546_185705_e.txt	78	0.085	0.10	-3.78	40.3	10.00
53	20091214_Hannover_hm01_hella_mean_185729_185908_e.txt	98	0.045	2.17	-4.57	36.9	0.65
54	20091214_Hannover_hm01_hella_mean_190017_190240_e.txt	143	0.048	5.99	-5.68	38.7	9.97
55	20091215_Braunschweig_hm01_hella_mean_073152_073400_e.txt	129	0.053	0.16	-4.15	34.9	8.12
56	20091215_Braunschweig_hm01_hella_mean_073935_074250_e.txt	195	0.167	4.69	-4.76	38.2	10.00

Identifizierte Parameter – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Dateiname	Folgefahrtdauer [s]	Theil's U combined	a [m/s^2]	b [m/s^2]	V [m/s]	s [m]
57	20091215_Braunschweig_hm01_hella_mean_075025_075351_e.txt	205	0.071	2.14	-4.70	40.1	0.55
58	20091215_Hannover_hm01_hella_mean_195932_200039_e.txt	68	0.064	0.19	-2.62	43.5	10.00
59	20091215_Hannover_hm01_hella_mean_200718_200822_e.txt	64	0.074	0.28	-8.00	40.6	2.12
60	20091216_Braunschweig_hm01_hella_mean_081627_081748_e.txt	81	0.061	5.99	-5.13	32.5	0.50
61	20091216_Braunschweig_hm01_hella_mean_082108_082449_e.txt	221	0.124	0.63	-6.03	36.4	10.00
62	20091216_Braunschweig_hm01_hella_mean_082858_083019_e.txt	81	0.102	1.55	-4.29	40.1	0.50
63	20091216_Braunschweig_hm01_hella_mean_083151_083319_e.txt	88	0.055	1.40	-4.34	37.1	0.50
64	20091216_Braunschweig_hm01_hella_mean_084008_084119_e.txt	72	0.060	0.20	-5.33	44.0	2.50
65	20091217_Braunschweig_hm01_hella_mean_082439_083004_e.txt	325	0.201	0.13	-6.52	43.3	9.97
66	20091217_Braunschweig_hm01_hella_mean_083303_083412_e.txt	68	0.053	0.10	-5.25	38.2	10.00
67	20091217_Braunschweig_hm01_hella_mean_083457_084117_e.txt	380	0.100	0.93	-4.71	39.9	4.27
68	20091217_Braunschweig_hm01_hella_mean_084124_084235_e.txt	70	0.031	0.45	-4.85	35.5	3.40
69	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_183744_183908_e.txt	84	0.079	4.97	-5.34	40.7	10.00
70	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_183933_184126_e.txt	113	0.167	6.00	-4.90	38.7	9.95
71	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_184129_184459_e.txt	210	0.076	0.10	-5.06	37.5	9.95
72	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_190042_190650_e.txt	368	0.156	1.25	-6.29	23.7	3.02
73	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_190650_190945_e.txt	175	0.200	0.80	-6.26	17.2	2.96
74	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_190945_191952_e.txt	607	0.156	0.72	-2.25	43.9	2.24
75	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_192219_192442_e.txt	143	0.077	2.07	-8.00	43.9	8.06
76	20091217_Hannover_hm01_hella_mean_192519_192632_e.txt	73	0.044	3.28	-5.47	37.1	0.50
77	20091218_Braunschweig_hm01_hella_mean_075947_080143_e.txt	116	0.046	1.15	-5.77	27.3	9.99
78	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_164945_165137_e.txt	112	0.102	0.67	-2.60	26.9	0.50
79	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_165147_165548_e.txt	241	0.167	0.71	-2.47	36.8	4.79
80	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_165548_170346_e.txt	478	0.140	0.47	-3.56	32.3	2.00
81	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_170417_170604_e.txt	107	0.106	0.77	-3.24	40.2	0.51
82	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_171804_172714_e.txt	550	0.179	0.75	-8.00	35.5	8.60
83	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_172802_172914_e.txt	73	0.142	0.53	-0.22	10.3	9.88
84	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_173846_174442_e.txt	356	0.131	0.83	-3.61	43.9	3.04
85	20091221_Hannover_hm01_hella_mean_174442_175425_e.txt	583	0.167	0.70	-2.21	12.1	3.69

Tabelle D.8: Werte der Fehlermaße (Abstand) für Folgefahrten dem Versuchsfahrzeug nachfolgende Fahrzeuge (Hella)

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m]	MPE [%]	MAE [m]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m]	std emp [m]	mean sim [m]	std sim [m]
1	187	-0.01	-0.000	2.03	8.68	8.24	2.44	10.68	0.049	0.88	0.000	0.054	0.950	24.6	5.2	24.6	4.6
2	167	1.13	0.010	4.42	9.40	9.50	5.48	11.15	0.055	0.96	0.043	0.240	0.721	46.5	14.9	47.6	17.6
3	133	0.42	0.007	2.53	9.35	7.83	3.37	13.33	0.050	0.95	0.016	0.076	0.914	32.3	10.3	32.7	9.4
4	134	-0.32	-0.003	2.36	3.83	3.74	3.03	4.91	0.024	0.95	0.011	0.099	0.894	62.9	9.9	62.6	9.0
5	126	-0.00	-0.000	2.47	8.44	8.01	3.00	11.05	0.048	0.85	0.000	0.061	0.945	30.9	5.6	30.9	4.9
6	142	0.32	0.004	3.35	8.39	7.66	3.98	10.17	0.044	0.93	0.007	0.041	0.957	43.8	10.8	44.1	10.0
7	237	0.29	0.001	6.31	11.99	8.60	8.69	22.76	0.057	0.92	0.001	0.086	0.916	73.4	22.4	73.6	19.9
8	148	0.46	0.013	2.44	19.24	15.01	2.90	26.67	0.081	0.92	0.025	0.058	0.922	16.3	7.4	16.7	6.7
9	121	0.28	0.005	1.81	9.23	6.12	2.37	14.89	0.036	0.99	0.014	0.022	0.970	29.5	14.1	29.8	13.7
10	91	0.34	0.010	0.93	4.68	3.64	1.27	6.53	0.020	1.00	0.071	0.033	0.903	25.5	18.8	25.8	19.1
11	75	1.00	0.024	3.81	11.92	9.80	4.70	16.35	0.058	0.92	0.045	0.387	0.577	38.9	10.3	39.9	7.4
12	176	1.14	0.026	1.60	12.60	8.98	2.10	19.13	0.046	0.99	0.298	0.001	0.704	17.8	13.7	18.9	13.8
13	73	0.18	0.005	1.71	8.68	5.09	2.04	12.00	0.023	1.00	0.008	0.003	0.998	33.6	29.6	33.8	29.7
14	99	0.04	0.001	0.78	3.63	3.09	1.02	4.93	0.019	0.99	0.002	0.001	1.005	25.3	9.1	25.3	9.1
15	185	0.32	0.005	3.61	17.78	14.45	4.49	25.75	0.083	0.90	0.005	0.052	0.947	25.0	10.2	25.3	9.2

Werte der Fehlermaße (Abstand) – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m]	MPE [%]	MAE [m]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m]	std emp [m]	mean sim [m]	std sim [m]
16	72	0.20	0.005	1.25	3.48	3.41	1.73	5.07	0.024	0.73	0.014	0.134	0.862	36.6	2.5	36.8	1.9
17	114	-0.20	-0.003	2.31	7.99	5.71	2.84	10.44	0.029	0.99	0.005	0.050	0.951	40.4	27.8	40.2	27.2
18	215	0.55	0.011	3.31	23.15	20.80	4.06	29.43	0.119	0.79	0.019	0.279	0.706	15.9	6.4	16.5	4.3
19	120	0.06	0.001	1.32	4.91	4.74	1.59	6.11	0.028	0.97	0.001	0.058	0.946	27.9	6.4	28.0	6.0
20	174	0.95	0.009	6.40	16.07	14.85	7.82	20.21	0.088	0.75	0.015	0.248	0.741	43.1	11.6	44.0	7.7
21	174	-0.12	-0.001	2.97	8.05	6.97	3.98	11.45	0.045	0.94	0.001	0.027	0.976	42.6	11.0	42.5	11.7
22	64	0.07	0.001	3.31	4.01	3.77	3.99	5.08	0.023	0.95	0.000	0.040	0.971	87.6	12.6	87.7	11.8
23	218	0.05	0.000	1.83	4.25	3.29	2.34	5.95	0.019	1.00	0.000	0.066	0.937	55.5	27.2	55.6	26.6
24	122	0.16	0.003	3.46	15.50	11.03	4.29	21.02	0.054	0.99	0.001	0.067	0.937	31.3	24.6	31.5	23.5
25	137	0.10	0.002	2.37	8.11	7.18	2.85	10.19	0.041	0.96	0.001	0.019	0.985	33.0	10.4	33.1	10.0
26	233	0.88	0.006	9.49	22.23	20.41	11.46	26.67	0.115	0.81	0.006	0.242	0.756	46.5	19.2	47.4	13.6
27	108	1.95	0.023	8.77	21.95	15.79	10.38	30.31	0.085	0.91	0.035	0.019	0.952	55.6	24.4	57.5	22.9
28	125	-0.31	-0.003	2.70	5.70	5.26	3.50	7.72	0.033	0.97	0.008	0.057	0.940	51.3	15.1	51.0	14.2
29	76	0.70	0.019	1.61	6.16	4.71	1.93	8.67	0.026	0.99	0.130	0.327	0.551	34.1	13.4	34.8	12.3
30	76	-0.35	-0.007	2.74	6.19	5.90	3.20	7.34	0.033	0.98	0.012	0.013	0.984	46.5	16.2	46.2	16.5
31	66	-0.13	-0.002	1.61	2.80	2.72	2.07	3.85	0.017	0.94	0.004	0.000	1.006	59.1	5.9	59.0	5.9
32	61	0.64	0.015	1.70	3.65	3.59	2.12	4.66	0.022	0.98	0.091	0.144	0.775	47.4	10.0	48.0	9.2
33	143	0.35	0.006	3.75	13.36	13.15	4.80	16.16	0.079	0.93	0.005	0.417	0.583	28.5	11.4	28.8	8.3
34	98	0.05	0.001	2.29	7.62	7.30	3.00	10.49	0.047	0.69	0.000	0.025	0.982	31.4	4.0	31.4	3.6
35	69	0.03	0.000	1.35	1.23	1.36	2.04	1.73	0.010	0.99	0.000	0.000	1.010	99.6	17.4	99.7	17.5
36	161	0.93	0.013	5.11	19.32	16.80	5.84	23.79	0.092	0.73	0.025	0.347	0.632	30.4	8.2	31.4	4.8
37	91	0.07	0.002	3.12	14.89	11.14	3.93	20.54	0.063	0.96	0.000	0.020	0.988	28.0	13.3	28.1	13.8
38	242	0.49	0.005	4.03	15.91	12.98	5.24	22.94	0.076	0.94	0.009	0.008	0.987	31.0	14.7	31.5	14.3
39	67	0.29	0.009	1.57	5.97	4.87	1.93	7.69	0.027	0.99	0.022	0.004	0.984	32.2	14.2	32.5	14.4
40	121	-0.05	-0.001	0.79	1.75	1.70	0.96	2.15	0.010	0.99	0.003	0.043	0.960	46.3	9.4	46.2	9.2
41	77	0.54	0.021	2.24	12.36	9.68	2.60	15.49	0.049	0.98	0.043	0.026	0.940	23.1	12.4	23.7	12.8
42	137	-0.43	-0.004	5.69	18.40	11.54	7.20	27.35	0.064	0.97	0.004	0.083	0.918	49.3	28.0	48.8	25.9
43	239	1.55	0.011	8.33	27.23	20.55	11.75	46.39	0.137	0.56	0.017	0.282	0.703	40.5	14.1	42.1	7.8
44	111	0.76	0.018	5.08	20.69	18.96	5.75	24.99	0.104	0.39	0.018	0.728	0.260	26.8	6.1	27.6	1.2
45	74	0.61	0.017	4.08	13.40	12.22	5.19	16.73	0.075	0.81	0.014	0.215	0.781	33.4	8.8	34.0	6.4
46	267	0.14	0.002	3.60	16.97	15.20	4.69	23.19	0.090	0.91	0.001	0.034	0.968	23.7	11.4	23.9	10.6
47	106	0.98	0.010	7.01	15.62	11.06	8.99	25.03	0.067	0.92	0.012	0.004	0.991	63.3	22.4	64.3	21.8
48	68	0.06	0.004	1.12	8.06	7.38	1.42	10.51	0.046	0.88	0.002	0.061	0.948	15.2	3.0	15.3	2.6
49	101	0.60	0.005	4.42	6.27	5.70	5.32	8.57	0.034	0.89	0.013	0.475	0.519	77.5	10.1	78.1	6.4
50	70	0.18	0.003	0.60	0.99	1.02	0.71	1.13	0.006	1.00	0.062	0.220	0.727	59.0	10.9	59.2	11.2
51	68	-1.33	-0.029	3.70	7.62	7.67	4.31	8.81	0.045	0.89	0.096	0.101	0.813	48.2	7.5	46.9	8.9
52	78	1.68	0.028	6.38	13.19	11.92	8.13	18.64	0.073	0.89	0.043	0.536	0.430	53.5	14.9	55.2	8.9
53	98	0.12	0.002	2.05	5.48	5.66	2.73	7.23	0.038	0.76	0.002	0.033	0.973	36.2	3.6	36.3	4.1
54	143	0.19	0.002	3.26	8.34	7.46	3.88	10.01	0.041	0.98	0.002	0.154	0.849	43.7	17.7	43.9	19.2
55	129	-0.02	-0.000	4.02	8.77	7.61	4.81	11.47	0.042	0.97	0.000	0.006	0.999	52.8	20.3	52.7	20.7
56	195	2.98	0.027	11.85	35.40	29.89	13.26	43.57	0.156	0.33	0.051	0.185	0.767	39.6	13.3	42.6	7.6
57	205	0.31	0.003	4.05	12.99	10.88	5.26	16.93	0.063	0.96	0.003	0.034	0.966	37.3	19.4	37.6	18.4
58	68	1.60	0.017	9.37	9.67	9.45	10.39	10.92	0.052	0.59	0.024	0.538	0.449	99.1	12.4	100.7	4.8
59	64	1.41	0.038	4.07	13.68	10.04	5.54	22.27	0.060	0.97	0.065	0.002	0.943	40.6	20.8	42.0	21.1
60	81	0.10	0.003	2.15	9.01	8.48	2.50	10.49	0.047	0.94	0.002	0.077	0.930	25.4	7.6	25.5	6.9
61	221	-0.44	-0.003	7.76	22.39	19.64	9.34	29.36	0.112	0.77	0.002	0.000	1.001	39.5	13.9	39.1	13.8
62	81	0.84	0.018	6.00	18.51	14.48	7.77	25.42	0.089	0.82	0.012	0.118	0.879	41.4	13.6	42.2	10.9
63	88	-0.16	-0.003	3.38	9.02	7.89	3.88	11.07	0.042	0.98	0.002	0.180	0.827	42.8	17.8	42.7	16.2
64	72	1.17	0.036	2.68	8.40	8.33	3.38	10.37	0.049	0.95	0.119	0.084	0.805	32.2	9.1	33.4	10.1
65	325	0.31	0.002	11.83	29.34	29.29	15.76	36.84	0.184	0.38	0.000	0.036	0.965	40.4	15.4	40.7	12.4
66	68	2.11	0.048	3.77	10.30	8.42	4.38	13.40	0.046	0.96	0.232	0.261	0.515	44.8	12.4	46.9	10.2
67	380	0.53	0.003	4.60	14.27	14.09	5.98	18.67	0.089	0.68	0.008	0.324	0.670	32.6	8.0	33.2	4.6
68	70	0.53	0.013	1.61	3.95	3.92	1.89	4.67	0.023	0.98	0.078	0.173	0.758	41.0	7.8	41.6	8.6
69	84	0.27	0.006	3.95	12.17	10.47	5.14	16.26	0.065	0.90	0.003	0.026	0.979	37.8	12.0	38.1	11.2
70	113	-1.21	-0.015	11.35	21.81	22.61	15.32	27.92	0.142	0.79	0.006	0.245	0.755	50.2	24.5	49.0	16.9
71	210	-0.08	-0.001	5.73	10.33	10.65	7.36	12.72	0.066	0.89	0.000	0.116	0.887	53.8	13.5	53.8	16.0
72	368	0.17	0.005	1.52	34.36	23.24	2.04	50.33	0.112	0.95	0.007	0.045	0.950	6.6	6.5	6.7	6.0
73	175	0.43	0.017	2.25	26.93	21.95	3.63	38.23	0.156	0.79	0.014	0.157	0.833	10.2	5.9	10.7	4.4

Werte der Fehlermaße (Abstand) – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m]	MPE [%]	MAE [m]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m]	std emp [m]	mean sim [m]	std sim [m]
74	607	0.31	0.003	2.26	23.38	19.17	2.86	32.93	0.107	0.89	0.012	0.052	0.938	11.8	6.3	12.1	5.7
75	143	0.19	0.004	3.01	16.23	12.54	3.74	21.50	0.066	0.97	0.003	0.006	0.996	24.0	15.1	24.2	14.8
76	73	0.14	0.004	1.81	7.53	5.78	2.30	11.56	0.034	0.98	0.004	0.023	0.983	31.3	12.1	31.4	11.7
77	116	0.02	0.000	1.73	6.30	5.89	2.29	8.67	0.039	0.86	0.000	0.107	0.899	29.3	4.5	29.4	3.7
78	112	1.47	0.025	5.28	21.02	14.00	6.50	32.34	0.078	0.94	0.051	0.239	0.716	37.7	17.7	39.2	14.5
79	241	0.95	0.011	5.90	29.01	23.31	8.07	39.89	0.137	0.85	0.014	0.080	0.909	25.3	15.3	26.2	13.0
80	478	0.13	0.001	5.04	20.94	18.70	6.90	29.90	0.119	0.80	0.000	0.096	0.905	27.0	11.5	27.1	9.3
81	107	0.56	0.010	4.90	14.28	12.71	6.54	19.60	0.083	0.60	0.007	0.339	0.660	38.6	8.1	39.1	4.3
82	550	0.61	0.005	3.23	26.08	20.87	4.56	41.07	0.140	0.50	0.018	0.288	0.695	15.5	5.2	16.1	2.8
83	73	0.04	0.002	0.92	5.55	5.79	1.27	7.66	0.037	0.98	0.001	0.107	0.902	15.8	6.5	15.9	6.9
84	356	0.16	0.004	1.27	43.48	16.98	1.64	95.34	0.096	0.93	0.009	0.103	0.890	7.5	4.3	7.6	3.8
85	583	0.26	0.003	1.94	23.50	19.43	2.39	33.72	0.113	0.71	0.012	0.051	0.938	10.0	3.3	10.3	2.8

Tabelle D.9: Werte der Fehlermaße (Geschwindigkeit) für Folgefahrten dem Versuchsfahrzeug nachfolgende Fahrzeuge (Hella)

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m/s]	MPE [%]	MAE [m/s]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m/s]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m/s]	std emp [m/s]	mean sim [m/s]	std sim [m/s]
1	187	-0.01	-0.000	0.40	1.49	1.49	0.47	1.78	0.009	0.92	0.000	0.009	0.995	26.6	1.2	26.6	1.2
2	167	0.06	0.001	0.44	1.30	1.28	0.54	1.59	0.008	0.85	0.014	0.025	0.965	34.6	1.0	34.7	0.9
3	133	0.00	0.000	0.41	1.39	1.38	0.51	1.74	0.009	0.94	0.000	0.000	1.005	30.1	1.5	30.1	1.5
4	134	0.05	0.001	0.41	1.33	1.31	0.50	1.65	0.008	0.95	0.010	0.087	0.908	30.9	1.5	30.9	1.4
5	126	0.03	0.000	0.54	1.35	1.35	0.68	1.69	0.008	0.92	0.002	0.008	0.995	40.0	1.7	40.1	1.6
6	142	-0.04	-0.001	0.45	1.55	1.52	0.57	1.98	0.010	0.94	0.006	0.080	0.919	29.7	1.6	29.6	1.5
7	237	-0.13	-0.001	0.63	1.97	1.98	0.82	2.55	0.013	0.77	0.027	0.001	0.976	31.9	1.2	31.8	1.2
8	148	-0.03	-0.000	0.43	1.39	1.41	0.54	1.74	0.009	0.97	0.003	0.015	0.987	30.6	2.1	30.5	2.2
9	121	-0.07	-0.001	0.31	0.99	0.97	0.43	1.39	0.007	0.98	0.026	0.063	0.916	32.4	2.2	32.3	2.3
10	91	-0.03	-0.001	0.31	0.89	0.90	0.40	1.15	0.006	0.99	0.008	0.001	0.999	34.1	3.2	34.1	3.2
11	75	-0.00	-0.000	0.44	1.63	1.63	0.55	2.03	0.010	0.66	0.000	0.270	0.740	26.8	0.7	26.8	0.4
12	176	0.00	0.000	0.45	1.68	1.68	0.59	2.16	0.011	0.97	0.000	0.003	1.001	27.0	2.5	27.0	2.5
13	73	-0.04	-0.002	0.35	1.30	1.30	0.40	1.50	0.007	0.89	0.012	0.076	0.922	26.7	0.9	26.7	0.8
14	99	-0.03	-0.001	0.33	0.99	0.98	0.43	1.29	0.006	0.98	0.004	0.023	0.979	33.6	2.4	33.6	2.3
15	185	-0.09	-0.001	0.69	2.12	2.13	0.91	2.75	0.014	0.97	0.009	0.049	0.946	32.7	3.8	32.6	3.6
16	72	-0.08	-0.002	0.46	1.28	1.28	0.60	1.66	0.008	0.86	0.020	0.005	0.985	36.2	1.1	36.1	1.1
17	114	-0.01	-0.000	0.40	1.08	1.07	0.53	1.42	0.007	0.89	0.000	0.002	1.004	37.7	1.1	37.6	1.1
18	215	-0.02	-0.000	0.54	1.61	1.57	0.70	2.12	0.010	0.97	0.001	0.104	0.899	34.2	2.9	34.2	2.7
19	120	-0.02	-0.000	0.27	0.81	0.81	0.40	1.17	0.006	0.20	0.003	0.001	1.002	33.7	0.3	33.7	0.3
20	174	0.01	0.000	0.76	2.31	2.30	0.93	2.79	0.014	0.78	0.000	0.007	0.997	33.2	1.5	33.2	1.4
21	174	-0.01	-0.000	0.64	2.51	2.19	0.99	4.31	0.017	0.98	0.000	0.004	1.000	29.3	5.0	29.3	5.0
22	64	0.01	0.000	0.68	2.20	2.19	0.80	2.62	0.013	0.56	0.000	0.449	0.562	30.8	1.0	30.8	0.4
23	218	-0.02	-0.000	0.33	0.96	0.95	0.47	1.39	0.007	0.94	0.002	0.075	0.926	34.5	1.4	34.5	1.3
24	122	0.02	0.000	0.54	1.34	1.33	0.62	1.56	0.008	0.92	0.001	0.043	0.962	40.2	1.6	40.2	1.5
25	137	0.02	0.000	0.51	1.51	1.51	0.63	1.86	0.009	0.85	0.001	0.018	0.986	33.9	1.2	33.9	1.1
26	233	0.08	0.001	1.10	2.98	3.02	1.37	3.65	0.019	0.87	0.003	0.013	0.986	36.4	2.5	36.5	2.7
27	108	0.12	0.002	1.30	3.22	3.10	1.70	4.34	0.020	0.93	0.005	0.138	0.863	41.8	4.6	42.0	3.9
28	125	-0.02	-0.000	0.52	1.43	1.40	0.68	1.93	0.009	0.91	0.001	0.004	1.001	36.8	1.6	36.8	1.5
29	76	-0.01	-0.001	0.42	3.62	3.60	0.56	4.85	0.023	0.97	0.001	0.000	1.009	11.8	2.2	11.7	2.2
30	76	0.10	0.003	0.60	1.72	1.74	0.73	2.09	0.010	0.97	0.019	0.005	0.985	34.7	3.1	34.8	3.0
31	66	-0.12	-0.004	0.42	1.16	1.16	0.53	1.46	0.007	0.85	0.052	0.086	0.872	35.9	1.0	35.8	0.8
32	61	-0.00	-0.000	0.34	0.98	0.98	0.41	1.18	0.006	0.85	0.000	0.021	0.990	34.7	0.8	34.7	0.7
33	143	0.07	0.001	0.51	1.39	1.39	0.60	1.65	0.008	0.96	0.013	0.110	0.883	36.7	2.2	36.8	2.0
34	98	0.01	0.000	0.50	1.38	1.37	0.67	1.89	0.009	0.80	0.000	0.052	0.955	36.6	1.1	36.6	1.0

Werte der Fehlermaße (Geschwindigkeit) – Fortsetzung

Folgefahrtnummer	Folgefahrtdauer [s]	ME [m/s]	MPE [%]	MAE [m/s]	MAPE [%]	BF [%]	RMSE [m/s]	RMSPE [%]	Theil's U	r	Um	Us	Uc	mean emp [m/s]	std emp [m/s]	mean sim [m/s]	std sim [m/s]
35	69	0.13	0.004	0.39	1.06	1.05	0.54	1.49	0.007	0.55	0.056	0.210	0.743	36.9	0.6	37.1	0.4
36	161	0.01	0.000	0.45	1.51	1.51	0.58	1.97	0.010	0.83	0.000	0.044	0.961	29.9	1.0	29.9	0.9
37	91	-0.17	-0.004	0.63	1.99	2.02	0.87	2.71	0.014	0.22	0.038	0.311	0.658	31.0	0.9	30.8	0.4
38	242	-0.01	-0.000	0.40	1.09	1.10	0.58	1.54	0.008	0.95	0.000	0.001	1.002	36.8	1.9	36.8	1.9
39	67	-0.01	-0.000	0.32	0.82	0.82	0.38	0.97	0.005	0.93	0.001	0.012	0.998	38.7	1.0	38.6	1.0
40	121	0.01	0.000	0.21	0.58	0.58	0.26	0.72	0.004	0.97	0.001	0.039	0.966	35.6	1.1	35.6	1.0
41	77	0.02	0.000	0.51	1.32	1.32	0.65	1.69	0.008	0.95	0.001	0.009	1.000	38.6	2.1	38.6	2.0
42	137	0.03	0.000	0.57	1.41	1.39	0.76	1.89	0.009	0.96	0.002	0.108	0.895	41.0	2.8	41.0	2.6
43	239	-0.09	-0.001	0.93	2.72	2.69	1.22	3.54	0.018	0.97	0.005	0.122	0.875	34.5	4.8	34.4	4.4
44	111	-0.00	-0.000	0.67	1.77	1.76	0.83	2.19	0.011	0.61	0.000	0.179	0.827	37.9	1.1	37.9	0.7
45	74	0.19	0.006	0.56	1.95	1.93	0.68	2.40	0.012	0.79	0.081	0.087	0.840	29.0	1.1	29.2	0.9
46	267	-0.04	-0.000	0.65	1.80	1.78	0.81	2.24	0.011	0.97	0.003	0.013	0.987	36.5	3.2	36.5	3.1
47	106	-0.18	-0.003	0.64	1.85	1.85	0.78	2.25	0.011	0.81	0.051	0.082	0.874	34.8	1.3	34.7	1.1
48	68	0.01	0.000	0.35	1.23	1.18	0.45	1.63	0.008	0.99	0.001	0.002	1.008	29.9	3.8	29.9	3.9
49	101	-0.14	-0.003	0.70	1.90	1.86	0.97	2.67	0.013	0.90	0.021	0.070	0.917	37.7	1.9	37.6	2.2
50	70	0.01	0.000	0.20	0.51	0.51	0.24	0.62	0.003	0.97	0.001	0.009	1.000	38.4	1.0	38.4	1.0
51	68	-0.03	-0.001	0.51	1.30	1.30	0.65	1.65	0.008	0.21	0.003	0.049	0.959	39.3	0.6	39.3	0.4
52	78	0.11	0.003	0.65	1.90	1.90	0.84	2.47	0.012	0.89	0.019	0.431	0.559	33.9	1.7	34.0	1.1
53	98	-0.02	-0.000	0.41	1.12	1.11	0.54	1.49	0.007	0.50	0.001	0.249	0.757	36.7	0.6	36.7	0.4
54	143	-0.02	-0.000	0.43	1.13	1.13	0.53	1.42	0.007	0.88	0.001	0.002	1.002	37.8	1.1	37.8	1.1
55	129	-0.08	-0.001	0.54	1.70	1.71	0.66	2.05	0.010	0.81	0.014	0.108	0.884	31.9	1.1	31.8	0.9
56	195	0.08	0.001	0.67	1.81	1.79	0.85	2.32	0.011	0.75	0.008	0.000	0.995	37.3	1.2	37.3	1.2
57	205	0.08	0.001	0.47	1.24	1.23	0.60	1.59	0.008	0.92	0.018	0.006	0.979	38.2	1.5	38.2	1.5
58	68	0.11	0.003	0.78	2.14	2.13	0.87	2.38	0.012	0.53	0.015	0.380	0.616	36.9	1.0	37.0	0.5
59	64	-0.27	-0.007	0.95	2.13	2.13	1.24	2.77	0.014	0.91	0.047	0.089	0.874	44.7	2.9	44.4	2.5
60	81	0.07	0.002	0.61	2.11	2.05	0.83	2.90	0.014	0.96	0.008	0.029	0.972	29.7	2.8	29.8	3.0
61	221	-0.03	-0.000	0.64	1.81	1.83	0.83	2.31	0.012	0.77	0.002	0.066	0.935	35.0	1.3	35.0	1.1
62	81	-0.17	-0.004	0.78	2.05	2.04	1.00	2.64	0.013	0.66	0.028	0.000	0.980	38.4	1.2	38.3	1.2
63	88	-0.12	-0.003	0.71	2.01	2.01	0.89	2.51	0.013	0.83	0.019	0.031	0.957	35.5	1.6	35.3	1.4
64	72	0.01	0.000	0.64	1.74	1.74	0.76	2.08	0.010	0.82	0.000	0.092	0.918	36.9	1.3	36.9	1.1
65	325	0.11	0.001	0.87	2.77	2.70	1.15	3.68	0.018	0.95	0.009	0.144	0.850	32.0	3.0	32.1	3.4
66	68	0.05	0.001	0.38	1.09	1.09	0.50	1.43	0.007	0.77	0.009	0.259	0.742	35.2	0.8	35.2	0.5
67	380	-0.00	-0.000	0.59	1.70	1.66	0.76	2.22	0.011	0.97	0.000	0.016	0.985	35.6	3.0	35.6	2.9
68	70	-0.03	-0.001	0.46	1.25	1.24	0.59	1.62	0.008	0.90	0.003	0.066	0.941	37.1	1.4	37.1	1.2
69	84	0.00	0.000	0.96	2.37	2.38	1.16	2.84	0.014	0.70	0.000	0.415	0.594	40.2	1.6	40.2	0.8
70	113	-0.12	-0.002	1.47	3.89	3.87	1.90	5.13	0.025	0.53	0.004	0.503	0.500	38.0	2.2	37.9	0.9
71	210	0.04	0.000	0.57	1.64	1.63	0.72	2.11	0.010	0.95	0.004	0.104	0.895	34.7	2.2	34.7	2.0
72	368	-0.01	-0.001	0.33	Inf	10.07	0.47	Inf	0.045	0.99	0.000	0.015	0.986	3.2	4.1	3.2	4.1
73	175	0.14	0.007	0.59	13.67	7.13	0.86	28.50	0.044	0.99	0.025	0.006	0.973	8.2	5.1	8.3	5.1
74	607	0.01	0.000	0.52	9.38	8.30	0.66	13.13	0.049	0.96	0.000	0.043	0.958	6.3	2.3	6.3	2.1
75	143	0.03	0.000	0.65	1.87	1.82	0.79	2.33	0.011	0.98	0.002	0.004	0.999	35.5	3.7	35.5	3.8
76	73	0.01	0.000	0.56	1.60	1.58	0.66	1.90	0.009	0.95	0.000	0.011	0.998	35.6	2.2	35.7	2.2
77	116	-0.06	-0.001	0.30	1.09	1.10	0.37	1.37	0.007	0.85	0.029	0.082	0.894	26.9	0.7	26.8	0.6
78	112	-0.02	-0.001	0.74	3.93	3.87	0.91	4.81	0.024	0.95	0.000	0.026	0.980	19.2	2.9	19.1	2.7
79	241	0.06	0.001	0.60	6.33	5.09	0.78	9.64	0.030	0.99	0.006	0.008	0.989	11.8	5.1	11.9	5.1
80	478	-0.03	-0.000	0.65	3.65	3.40	0.82	4.74	0.020	0.99	0.001	0.033	0.967	19.2	5.7	19.2	5.6
81	107	0.23	0.006	0.78	3.29	3.13	1.13	5.22	0.023	0.82	0.042	0.262	0.702	25.0	1.9	25.2	1.3
82	550	-0.00	-0.000	0.60	7.94	6.75	0.76	10.74	0.039	0.98	0.000	0.001	1.001	8.8	3.9	8.8	3.9
83	73	-0.02	-0.016	0.22	Inf	19.90	0.32	Inf	0.105	0.96	0.003	0.002	1.005	1.1	1.1	1.1	1.1
84	356	0.00	0.000	0.27	Inf	6.46	0.38	Inf	0.036	0.99	0.000	0.002	1.000	4.1	3.4	4.1	3.4
85	583	-0.01	-0.000	0.39	Inf	8.35	0.54	Inf	0.055	0.94	0.000	0.004	0.997	4.6	1.6	4.6	1.6

Literaturverzeichnis

[ABAKM96] Ahmed, Kazi I. ; Ben-Akiva, Moshe E. ; Koutsopoulos, Haris N. ; Mishalani, Rabi G.: Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior. In: *Transportation and Traffic Theory. New York: Elsevier Science Publishing* (1996), S. 501–515

[ADA09] ADAC: *Fakten aus dem Verkehrsbereich*. Version: 2009. http://www1.adac.de/images/Fakten-aus-Verkehrsbereich_Fachinformation_%200904_tcm8-254277.pdf, Abruf: 05. Feb. 2010

[ADV06] Arem, Bart van ; Driel, Cornelie J. G. ; Visser, Ruben: The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 7 (2006), Nr. 4, S. 429–436. http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2006.884615. – DOI 10.1109/TITS.2006.884615. – ISSN 1524–9050

[Agr10] *Pressemeldung Agritechnica 2009 - Landwirtschaft zeigt sich selbstbewußt*. Version: 2010. http://presse.dlg.org/publicArtikelDetail.do?sub=agritechnica2009&artikelId=2870&spracheId=1&type=pdf, Abruf: 16. Jul. 2010

[Ahm99] Ahmed, Kazi I.: *Modeling drivers' acceleration and lane changing behavior*, Department of Civil and Enviromental Engineering - Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1999

[Aim09a] *Aimsun Microsimulator API Manual- Draft Version.* : *Aimsun Microsimulator API Manual- Draft Version*, January 2009

[Aim09b] *Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6 User's Manual - Draft Version.* : *Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6 User's Manual - Draft Version*, April 2009

[Akt07] *Aktiv - gemeinsam die Zukunft erfahren (Broschüre Gesamtprojekt)*. Version: 2007. http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/aktivimage-deutsch.pdf, Abruf: 05. Feb. 2010

[Akt08] *Aktiv-Online*. Version: 2008. http://www.aktiv-online.org/, Abruf: 22. Sept. 2008

[Aut09] *Verkehrslage in NRW, Hochrechnung für Autobahnen*. Version: 2009. http://www.autobahn.nrw.de, Abruf: 23.06.2009

[Aut10] *Autobahnatlas Online*. Version: 2010. http://www.autobahnatlas-online.de, Abruf: 02. Aug. 2010

[B.A09] B.A.S Verkehrstechnik: Kraftfahrer können Staulängen selbst beeinflussen. In: *Straßenverkehrstechnik* 12 (2009), S. 810

[BADT+00] Ben-Akiva, Moshe ; Davol, Angus ; Toledo, Tomer ; Koutsopoulos, Haris N. ; Burghout, Wilco ; Andréasson, Ingmar ; Johansson, Tobias ; Lundin, Christer: MITSIMLab for Stockholm, Enhancements, Calibration and Validation / Intelligent Transportation Systems Program, MIT,. 2000. – Forschungsbericht

[BADTK02] Ben-Akiva, Moshe ; Davol, Angus ; Toledo, Tomer ; Koustopoulos, Haris N.: Calibration and evaluation of MITSIMLab in Stockholm. In: *Transportation Research Board 82nd Annual Meeting*, 2002

[Bal98] *Kapitel* Methodolgy - Verification, Validation, and Testing. In: Balci, Osman: *Handbook of Simulation - Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. Wiley-Interscience Publication, 1998, S. 335–396

[Bee10] Beek, Frans op d.: At the helm. In: *Intertraffic World - Annual Showcase 2010* (2010), S. 50–51

[Ber69] Bertalanffy, Ludwig von: *General System Theory - Foundations, Development, Application*. New York : George Braziller, 1969

[BHJJ10] Burmann, Michael ; Hess, Rainer ; Jahnke, Jürgen ; Janker, Helmut: *Straßenverkehrsrecht*. München : C.H. Beck, 2010

[BHP+07] Beisel, Daniel ; Hänsel, Frank ; Poliak, Jan ; May, Jörg. C. ; Becker, Uwe ; Schnieder, Eckehard: DemoOrt - Satellitenbasierte fahrzeugautarke Ortung im Schienenverkehr. In: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig e.V. (Hrsg.): *POSITIONs*, 2007

[BK10] Berlitz, Jürgen ; Kugele, Wolfgang: Alltagsproblem Stau. In: *Internationales Verkehrswesen* 62 (2010), 7+8, S. 48–50

[BKR08] Boltze, Manfred ; Kittler, Wolfgang ; Roth, Nadine: Strategien zur Stauvermeidung. In: *Straßenverkehrstechnik* 5 (2008), S. 265–273

[BKW04a] Brockfeld, Elmar ; Kelpin, Rene ; Wagner, Peter: Performance of car following behaviour in microscopic traffic flow models. In: Möhlenbrink, W. (Hrsg.) ; Englmann, F.C. (Hrsg.) ; Friedrich, M. (Hrsg.) ; Martin, U. (Hrsg.) ; Hangleiter, U. (Hrsg.): *2nd International Symposium „Networks for Mobility“*, Universität Stuttgart, 2004. – ISBN 3–89301–180–3, 43 - 43

[BKW04b] Brockfeld, Elmar ; Kühne, Reinhart ; Wagner, Peter: Calibration and Validation of microscopic traffic flow models. In: *Transportation Research Board 84th Annual Meeting*, 2004

[BM94] Brackstone, Mark ; McDonald, Mike: Validity of microscopic modelling of motorway traffic. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium* (1994), Oct., S. 576–581. `http://dx.doi.org/10.1109/IVS.1994.639581`. – DOI 10.1109/IVS.1994.639581

[BM99] Brackstone, Mark ; McDonald, Mike: Car-following: a historical review. In: *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour* 2 (1999), Nr. 4, S. 181–196. http://dx.doi.org/doi:10.1016/S1369-8478(00)00005-X. – DOI doi:10.1016/S1369–8478(00)00005–X

[BM03] Brackstone, Mark ; McDonald, Mike: Driver behaviour and traffic modelling. Are we looking at the right issues? In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE* (2003), S. 517–521

[Bol06] Boltze, Manfred: Leitfaden Verkehrstelematik - Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2006. – Forschungsbericht

[Bou05] Bouattour, Sahla: *Hauptseminar: Optimierungsverfahren, WS04/05.* Seminarskript. http://www.uni-koblenz.de/FB4/Institutes/ICV/AGPaulus/Teachings/ws0405/semOpt/SemOptWS0405.pdf. Version: 2005

[BSK+10] Baumann, Martin ; Steenken, Rike ; Kassner, Astrid ; Weber, Lars ; Lüdtke, Andreas: Effects of situational characteristics on drivers' merging into freeway traffic. In: *HMAT Workshop on Human Modelling in Assisted Transportation*, 2010

[BSM02] Brackstone, Mark ; Sultan, Beshr ; McDonald, Mike: Motorway driver behaviour: studies on car following. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 5 (2002), Nr. 1, S. 31–46. http://dx.doi.org/doi:10.1016/S1369-8478(02)00004-9. – DOI doi:10.1016/S1369–8478(02)00004–9

[Bun02] Bundesanstalt für Strassenwesen (Hrsg.): *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen.* NW-Verlag, 2002

[Bun08] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): *Mobilität und Verkehrstechnologien - Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung.* 2008

[Bun09a] Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2009/2010.* Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, Hamburg, 2009

[Bun09b] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *E-Mail Anfrage vom 14.03.2009.* 2009

[Bur09] *Kapitel* A8-Vermeidbarkeitsbetrachtungen. In: Burg, Heinz: *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion.* Vieweg+Teubner, 2009, S. 251–260

[Che92] Chen, Zhenfu: *Menschliche und automatische Regelung der Längsbewegung von Personenkraftwagen*, Technische Universität Braunschweig, Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr.168 , VDI Verlag, Düsseldorf, 1992

[CHJ02] *Kapitel* Modelling and Simulation of Controlled Road Traffic. In: Czogalla, Olaf ; Hoyer, Robert ; Jumar, Ulrich: *Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems.* Springer, 2002, S. 419–435

[CHM58] Chandler, Robert E. ; Herman, Robert ; Montroll, Elliott W.: Traffic dynamics: studies in car following. In: *Operations research* 6 (1958), S. 165–184

[CLOR03] Chu, Lianyu ; Liu, Henry X. ; Oh, Jun-Seok ; Recker, Will: A calibration procedure for microscopic traffic simulation. In: *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems* 2 (2003), S. 1574–1579

[CP10] Ciuffo, Biagio ; Punzo, Vincenzo: Verification of Traffic Micro-simulation Model Calibration Procedures: Analysis of Goodness-of-Fit Measures. In: *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, 2010

[Dag97] Daganzo, Carlos F.: *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations.* Elsevier Science Ltd, 1997

[Dög07] Döge, Klaus-Peter: Bildauswerteverfahren AVISTAS - Ermittlung des Verkehrszustandses durch Analyse stochastischer Signale aus Kamerabildern. In: *3. VIMOS-Tagung*, 2007

[Die07] Dietsche, Karl-Heinz: *Vernetzung im Kraftfahrzeug.* Robert Bosch GmbH, 2007 (Elektrik und Elektronik für Kfz (Gelbe Reihe - Fachwissen Kfz-Technik))

[DIN02] Norm DIN 53804-1 April 2002. *Statistische Auswertungen, Teil 1: Kontinuierliche Merkmale*

[DLR08] *DLR Clearingstelle.* Version: 2008. http://www.dlr.de/cs/, Abruf: 22. Sept. 2008

[DLR09] *Institutsflyer Institut für Verkehrssystemtechnik - Technologien aus Luft- und Raumfahrt für Straße und Schiene (04/2009).* Version: 2009. http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/service/DLR-TS_Institutsflyer_090420.pdf, Abruf: 22. Dez. 2010

[DSA04] Dowling, Richard ; Skabardonis, Alexander ; Alexiadis, Vassili: Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software / The Federal Highway Administration. 2004. – Forschungsbericht

[Dyn10] *Dyna4 Driver Assistance.* Version: 2010. http://dynaware.tesis.de/de/index.php?page=2145, Abruf: 24. Jul. 2010

[Eve92] Everts, K. ; Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit (Hrsg.): *Hinweise zur Verkehrsflussanalyse, Störfallentdeckung und Verkehrsflussprognose für die Verkehrsbeeinflussung in Außerortsbereichen.* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1992

[FIH06] Friedrich, Bernard ; Irzik, Marco ; Hoffmann, Stephan: *Verkehrsablauf an Autobahnausfahrten des Typs A2 der RAL-K-2*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2006 (946)

[Fil02] Filzek, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2002. `http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000911`

[FKW01] Folkerts, Gundula ; Kirschfink, Heribert ; Weber, Richard: *Einsatz vin Fuzzy-Control für Verkehrsbeeinflussungsanlagen im Außerortsbereich*. Bundesministrerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, 2001 (818)

[For10] Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen: *PELOPS - White Paper*. Version: 2010. `http://www.pelops.de/pdf/pelops_whitepaper.pdf`, Abruf: 30. Mai 2010

[Fri94] Fritzsche, Hans-Thomas: A model for traffic simulation. In: *Traffic Engineering Control* 35 (1994), S. 317–321

[FV01] Fellendorf, Martin ; Vortisch, Peter: Validation of the microscopic traffic flow model VISSIM in different real-world situations. In: *Transportation Research Board 80th Annual Meeting*. Washington, D.C., 2001

[Gab91] Gabard, Jean-François: Car-following models. In: *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. Pergamon Press, 1991, S. 65–68

[GAl10] *GAlib - A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. Version: 2010. `http://lancet.mit.edu/ga/`, Abruf: 04. Jul. 2010

[Gan05] Ganzelmeier, Lothar: *Nichtlineare H∞ Regelung der Fahrzeuglängsdynamik*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik„ Diss., 2005. – VDI Verlag Düsseldorf

[GB09] *Kapitel* A5-Kinematik. In: Gratzer, Werner ; Becke, Manfred: *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*. Vieweg+Teubner, 2009, S. 89–169

[GH10] Garber, Nicholas J. ; Hoel, Lester A. ; Sakar, Raju (Hrsg.): *Traffic and Highway Engineering*. 4. Cengage Learning, 2010

[GHP59] Gazis, Denos C. ; Herman, Robert ; Potts, Renfrey B.: Car-following theory of steady-state traffic flow. In: *Operations Research* (1959), S. 499–505

[GHR61] Gazis, Denos C. ; Herman, Robert ; Rothery, Richard W.: Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow. In: *Operations Research* 9 (1961), S. 545–567

[Gip81] Gipps, Peter G.: A behavioural car-following model for computer simulation. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 15 (1981), April, Nr. 2, S. 105–111. `http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0`. – DOI 10.1016/0191–2615(81)90037–0

[Gip86] Gipps, P.G.: A model for the structure of lane-changing decisions. In: *Transportation Research Part B* 20 (1986), S. 403–414. http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(86)90012-3. – DOI 10.1016/0191–2615(86)90012–3

[GNA+02] Gurusinghe, Gemunu S. ; Nakatsuji, Takashi ; Azuta, Yoichi ; Ranjitkar, Prakash ; Tanaboriboon, Yordphol: Multiple car-following data with real-time kinematic global positioning system. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1802 (2002), S. 166–180

[Goo98] Goos, Gerhard: *Vorlesungen über Informatik 4: Paralleles Rechnen und nicht-analytische Lösungsverfahren*. Springer, 1998

[Guo09] Guo, Ruixue: *MITSIMLab Driver Behavior Model*. 2009. – Student Report (Draft)

[Har07] Harding, Jochen: *Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs*, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Diss., 2007

[HB99] Hidas, Peter ; Behbahanizadeh, Kamran: Microscopic Simulation of Lane Changing under Incident Conditions. In: *14th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory*. Jerusalem, Israel, 1999

[HBS01] *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2001

[Hel97] Helbing, Dirk: *Verkehrsdynamik - Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, 1997

[Hel06] Hella KGaA Hueck & Co.: *IDIS-ACC - Infrared Sensor for Lidar Based Distance Measurement, Version 2.1*, 2006

[Hen04] Henze, Roman: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*, Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2004

[Höf06] Höfler, Frank: *Verkehrswesen - Praxis*. Bd. 2. Bauwerk Verlag GmbH, 2006

[HKD09] Hentschel, Peter ; König, Peter ; Dauer, Peter: *Straßenverkehrsrecht*. Bd. 40. Auflage. München : Verlag C.H. Beck, 2009

[HL08] Hollander, Yaron ; Liu, Ronghui: The principles of calibrating traffic microsimulation models. In: *Transportation* 35 (2008), Nr. 3, S. 347–362

[HLHZ09] Hinsbergen, Chris P.IJ. v. ; Lint, Hans W.C. v. ; Hoogendoorn, Serge P. ; Zuylen, Henk J. v.: Bayesian Calibration of Car-Following Models. In: *12th IFAC Symposium on Transportation Systems*, 2009

[HLS09] Hübner, Matthias ; Lück, Tobias ; Schnieder, Eckehard: Traffic Flow Organization by Means of a Vehicle-Sided Rule-Bases. In: *IEEE 70th Vehicular Technology Conference*. Anchorage, Alaska, 2009

[HMK03] Hourdakis, John ; Michalopoulos, Panos G. ; Kottommannil, Jiji: Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. In: *Transportation Research Record* 1852 (2003), S. 130–139. – Paper revised from original submittal

[Hoe72] Hoefs, D.H.: *Entwicklung einer Messmethode über den Bewegungsablauf des Kolonnenverkehrs*. Universität Karlsruhe, Germany, 1972

[HOS06] Hoogendoorn, Serge P. ; Ossen, Saskia ; Schreuder, Marco: Empirics of Multianticipative Car-Following Behavior. In: *Transportation Research Record* 1965 (2006), S. 112–120

[HP59] Herman, Robert ; Potts, Renfrey B.: Single Lane Traffic Theory and Experiment. In: *Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow* (1959), S. 147–157. – Research Labs, General Motors

[HSS92] Herz, Raimund ; Schlichter, Hans G. ; Siegener, Wilfried: *Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner*. 2. Düsseldorf : Werner-Verlag, 1992

[HW04] Hidas, Peter ; Wagner, Peter: Review of Data Collection Methods for Microscopic Traffic Simulation. In: *Proceedings of WCTR*, 2004

[HWAK01] Hall, Fred ; Wakefield, Sarah ; Al-Kaisy, Ahmed: Freeway quality of service: What really matters to drivers and passengers? In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1776 (2001), S. 17–23. http://dx.doi.org/10.3141/1776-03. – DOI 10.3141/1776–03

[HZS+03] Hoogendoorn, Serge P. ; Zuylen, Van Henk J. ; Schreuder, Marco ; Gorte, Ben ; Vosselman, George: Traffic data collection from aerial imagery. In: *IFAC Transportation Systems*, 2003

[IB05] Invent-Büro: *Ergebnisbericht Verkehrsleistungsassistenz - VLA, Invent erfahren - mobil mit 8 Sinnen*. Version: April 2005. http://www.invent-online.de/de/aktuell.html, Abruf: 22. Sept. 2008

[Irz09] Irzik, Marco: *Überholverhalten auf 2+1-Strecken - Ein Beitrag zur Gestaltung von dreistreifigen Landstraßen*, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2009. http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00027821

[ISO02] Norm ISO 15622 10 2002. *Transport information and control systems - Adaptive Cruise Control systems - Performance requirements and test procedures*

[Ker02a] Schutzrecht Offenlegungsschrift DE 100 51 777 A 1 (April 2002). Kerner, Boris (Erfinder); Daimler Chrysler AG (Anmelder).

[Ker02b] Schutzrecht Offenlegungsschrift DE 100 62 856 A 1 (Juni 2002). Kerner, Boris (Erfinder); Daimler Chrysler AG (Anmelder).

[Ker04] Kerner, Boris S.: *Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory.* Springer Verlag, 2004

[Kes08] Kesting, Arne: *Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control*, Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Diss., 2008. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1204804167720-57734

[Küh04] Kühne, Reinhart: *Das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen (Entwurf).* Version: 2004. http://www.tfhrc.gov/its/tft/tft.htm, Abruf: 22. Sept. 2008. – FGSV Merkblatt

[Küh05] Kühne, Reinhart ; Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit (Hrsg.): *Hinweise zum Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen.* FGSV Verlag, 2005

[KLS07] Knake-Langhorst, Sascha ; Schiessl, Caroline: Local Traffic Condition - Improvement of a Vehicle Based Measurement Approach. In: Europe, Ertico I. (Hrsg.): *6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, 2007

[KPKT10] Kranke, Florian ; Poppe, Holger ; Kesting, Arne ; Treiber, Martin: Der Baustellenlotse - Ein stauvermeidenes Fahrerassistenzsystem. In: *Straßenverkehrstechnik* 1 (2010), S. 12–19

[KR97] Kerner, Boris S. ; Rehborn, Hubert: Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow. In: *Phys. Rev. Lett.* 79 (1997), Nov, Nr. 20, S. 4030–4033. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.4030. – DOI 10.1103/PhysRevLett.79.4030

[KR02] Schutzrecht Offenlegungsschrift DE 100 57 796 A 1 (Mai 2002). Kerner, Boris ; Rehborn, Hubert (Erfinder); Daimler Chrysler AG (Anmelder).

[Kra98] Krauss, Stefan: *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Mathematisches Institut, Universität zu Köln, Diss., 1998. – 116 S.

[Kra08] Krajzewicz, Daniel: Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. In: *Fortschritt-Berichte VDI: Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft, 2. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung*, 2008

[KTSH08] Kesting, Arne ; Treiber, Martin ; Schönhof, Martin ; Helbing, Dirk: Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16 (2008), Nr. 6, 668 - 683. http://dx.doi.org/DOI:10.1016/j.trc.2007.12.004. – DOI DOI: 10.1016/j.trc.2007.12.004. – ISSN 0968–090X

[KWG97] Krauss, Stefan ; Wagner, Peter ; Gawron, Christian: Metastable states in a microscopic model of traffic flow. In: *Phys. Rev. E* 55 (1997), May, Nr. 5, S. 5597–5602. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.55.5597. – DOI 10.1103/PhysRevE.55.5597

[LDW06] Lunt, George ; Day, Mark ; Wilson, Eddie R.: Enhancing motorway traffic data with novel vehicle re-identification algorithms. In: *Proceedings of the 13th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services*, 2006

[Leh05] Lehnhoff, N.: *Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen*, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, Diss., 2005

[Leh06] Lehnhoff, Nicola: ViVer - Konzept zur Verkehrsdatenerfassung für ein integriertes Verkehrsmanagement / Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover. 2006. – Forschungsbericht

[Leu88] Leutzbach, Wilhelm: *Introduction to the Theory of Traffic Flow (Extended and totally revised English language version of: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, Springer-Verlag, 1972).* Berlin : Springer-Verlag, 1988

[LP04] Lee, Kangwon ; Peng, Huei: Identification and verification of a longitudinal human driving model for collision warning and avoidance systems. In: *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 2 (2004), Nr. 1, S. 3–17

[LVZC+09] Li, Jie ; Van Zuylen, Henk ; Chen, Yusen ; Viti, Francesco ; Wilmink, Isabel: Optimizing Traffic Control for Emission Reduction: the calibration of the simulation model. In: *Mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport - ITS for larger Cities*, 2009

[Mar99] *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen.* Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast), 1999

[May10] May, Jörg C.: *Methodische Sicherheitsuntersuchung für einen innovativen Schienenverkehr am Beispiel der fahrzeugautarken Ortung*, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2010

[MB99] Minderhoud, Michiel M. ; Bovy, Piet H.: Impact of intelligent cruise control on motorway capacity. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1679 (1999), Nr. -1, S. 1–9

[MIT10a] *MITSIMLab at MIT - Intelligent Transportation Systems Program.* http://mit.edu/its/mitsimlab.html. Version: 2010, Abruf: 22.03.2010

[MIT10b] *MITSIMLab at sourceforge.* https://sourceforge.net/projects/mitsim/. Version: 2010, Abruf: 07.06.2010

[MKK+06] McDonald, Mike ; Keller, Hartmut ; Klijnhout, Job ; Mauro, Vito ; Hall, Richard ; Spence, Angela ; Hecht, Christoph ; Fakler, Oliver: *Intelligent transport systems in Europe - opportunities for future research*. World Scientific, 2006

[MMB01a] Marsden, Greg ; McDonald, Mike ; Brackstone, Mark: Towards an understanding of adaptive cruise control. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 9 (2001), Nr. 1, 33–51. http://dx.doi.org/10.1016/S0968-090X(00)00022-X. – DOI 10.1016/S0968–090X(00)00022–X

[MMB01b] McDonald, Mike ; Marsden, Greg ; Brackstone, Mark: Deployment of interurban ATT test scenarios (DIATS): implications for the European road network. In: *Transport Reviews* 21 (2001), Nr. 3, S. 303–335

[MMM09] Munk, Timo ; Mailer, Markus ; Matschke, Irina: Bewertung der Verkehrsqualität auf Basis der Wahrnehmung durch Verkehrsteilnehmer. In: *Mobil.TUM 2009 - International Scientific Conference on Mobility and Transport - ITS for larger Cities*, 2009

[MMZ06] Miska, Marc P. ; Muller, Theo H. ; Zuylen, Henk J.: Calibrating driving behavior with microscopic measurement data. In: *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE* (2006), Sept., S. 1609–1614. http://dx.doi.org/10.1109/ITSC.2006.1707454. – DOI 10.1109/ITSC.2006.1707454

[MWC+05] Mazur, Florian ; Weber, Daniel ; Chrobok, Roland ; Hafstein, Sigurour F. ; Pottmeier, Andreas ; Schreckenberg, Michael: Basics of the online traffic information system autobahn.NRW / Physics of Transport and Traffic, Universität Duisburg-Essen. 2005. – Forschungsbericht. – Hannover Messe 2005

[MZ07] Miska, Theo Marcand M. Marcand Muller ; Zuylen, Henk v.: A driving behavior model for microscopic online simulation based on remote sensing and equipped vehicle data / Technische Universität Delft. 2007. – Forschungsbericht

[NGS09] *NGSIM - Home of the Next Generation SIMimulation Community*. Version: 2009. http://ngsim.fhwa.dot.gov/, Abruf: 22. April 2009

[NS92] Nagel, Kai ; Schreckenberg, Michael: A cellular automaton model for freeway traffic. In: *Journal de Physique I* 2 (1992), Nr. 12, 2221-2229. http://www.edpsciences.org/10.1051/jp1:1992277

[OH08] Ossen, Saskia ; Hoogendoorn, Serge P.: Calibrating car-following models using microscopic trajectory data: A critical analysis of both microscopic trajectory data collection methods and calibration studies based on these data. / Delft University of Technology. 2008. – Forschungsbericht

[Ols03] Olsen, Erik C. B.: *Modeling Slow Lead Vehicle Lane Changing*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Diss., 2003

[OSM10] *OpenStreetMap - Die freie Wiki-Weltkarte.* Version: 2010. `http://www.openstreetmap.de`, Abruf: 20. Juni 2010

[Oss08] Ossen, Saskia: *Longitudinal Driving Behavior: Theory and Empirics*, Technische Universität Delft, Diss., 2008

[Oza93] Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the car following behaviour. In: *Proceedings of the 13th international Symposium on Traffic and Transportation Theory* (1993), S. 349–366

[Pap04] Papageorgiou, Markos: 6th Short Course, Dynamic Traffic Flow Modelling and Control, Chania, Greece, 2004

[Pap06] Papatzikou, Eleni: *Evaluation of Microsimulation Models Through Vehicle Tracking*, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Diplomarbeit, 2006

[PBC09] Punzo, Vincenzo ; Borzacchiello, Maria T. ; Ciuffo, Biagio: Estimation of vehicle trajectories from observed discrete positions and Next-Generation Simulation Program (NGSIM) data. In: *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, 2009

[PBC10] Punzo, Vincenzo ; Borzacchiello, Maria T. ; Ciuffo, Biagio: On the assessment of vehicle trajectory data accuracy and application to the Next Generation SIMulation (NGSIM) program data. In: *Transportation Research Part C* (2010). – to appear

[Pip53] Pipes, Louis A.: An operational analysis of traffic dynamics. In: *Journal of Applied Physics* Bd. 24. 1953, S. 274ff

[PKS09] Poppe, Holger ; Kranke, Florian ; Scheurer, Torsten: Dynamische Generierung von Strecken- und Verkehrszustandsattributen für Fahrerassistenzsysteme mit Car-to-X-Kommunikation. In: *AAET 2009 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Gesamtzentrum für Verkehr e.V., 2009, S. 228–237

[Pol09] Poliak, Ján: *Validierung von satellitenbasierten Eisenbahnortungssystemen*, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2009

[PS05] Punzo, Vincenzo ; Simonelli, Fulvio: Analysis and comparison of microscopic traffic flow models with real traffic microscopic data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1934 (2005), S. 53–63

[PTV08] PTV Planung Transport Verkehr AG: *VISSIM 5.10 Benutzerhandbuch.* 2008

[PW06] Park, Byungkyu (. ; Won, Jongsun: Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook / Virginia Transportation Research Council. 2006. – Forschungsbericht

[Reu50] Reuschel, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. In: *Z. d. Österreichisches Ingenieur Archiv Ver. 95* Bd. 95, 1950, S. 52–62 and 73–77

[Rie10] Riegelhuth, Gerd: Kooperative Systeme - Sicher und staufrei in die Zukunft. In: *Straßenverkehrstechnik* 4 (2010), S. 225–238

[Ris91] Risse, Hermann-Josef: Das Fahrerverhalten bei normaler Fahrzeugführung. In: *Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik* Bd. 160. Düsseldorf : VDI Verlag, Reihe 12, 1991

[RNA04] Ranjitkar, Prakash ; Nakatsuji, Takashi ; Asano, Motoki: Performance evaluation of microscopic traffic flow models with test track data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1876 (2004), S. 90–100

[RNK05] Ranjitkar, Prakash ; Nakatsuji, Takashi ; Kawamua, Akira: Car-Following Models: An Experiment Based Benchmarking. In: *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 6 (2005), S. 1582–1596

[Rob02] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC*. Robert Bosch GmbH, 2002

[SBKK05] Suikat, Reiner ; Brünger-Koch, Martin ; Kaufmann, Bernd: Bewegungssimulation für die Entwicklung und Bewertung von Fahrerassistenzsystemen. In: *Motion Simulator Conference*. Braunschweig, 2005, S. 136–144

[Sch90] Schütt, Holger: *Entwicklung und Erprobung eines sehr schnellen, bitorientierten Verkehrssimulationssystems für Straßennetze*, Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Diss., 1990

[Sch93] Schnieder, Eckehard: *Prozessinformatik: Automatisierung mit Rechensystemen - Einführung mit Petrinetzen*. 2. erweiterte Auflage. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg-Verlag, 1993

[Sch99] Schnieder, Eckehard: *Methoden der Automatisierungstechnik - Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg-Verlag, 1999

[Sch07] Schnieder, Eckehard (Hrsg.): *Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. Springer, 2007

[Sch08] Schnieder, Lars: Towards terminological rigour in the specification of complex automation systems. In: Schnieder, E. (Hrsg.) ; Tarnai, G. (Hrsg.): *Proceedings of Symposium FORMS/FORMAT - Formal Methods for Automation and Safety in Railway and Automotive Systems*. Budapest/Hungary, 2008, S. 141–148

[Sch10a] Schmidt, Marco: *Templimits auf Autobahnen 2008*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen bast, 2010

[Sch10b] SCHNEIDER, Timo: *Sensorsysteme zur Verkehrslageerfassung auf Bundesautobahnen*, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Bachelorarbeit, 2010

[SD10] SCHNIEDER, Lars ; DETERING, Stefan: Systemische Kalibrierung und Validierung von Simulationen zur Auslegung von Verkehrsassistenzsystemen. In: *AAET 2010 - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : ITS Niedersachsen e.V., 2010, S. 288–308

[SL97] SCHNABEL, Werner ; LOHSE, Dieter: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung Band I + II*. 2. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997

[Spa78] SPARMANN, Udo: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bd. 263: *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, 1978

[SS93] SCHADSCHNEIDER, Andreas ; SCHRECKENBERG, Michael: Cellular automaton models and traffic flow. In: *Journal of Physics* 26 (1993), 679-683. `http://dx.doi.org/10.1088/0305-4470/26/15/011`. – DOI 10.1088/0305–4470/26/15/011

[Str01] STROBEL, Horst: Analysis and Design of Traffic Control Systems: Potentials and Limits of Microscopic Modelling Approaches. In: *Proceedings: Control and Simulation of Transportation Processes on a Microscopic Level*, University of Zilina, CETRA Centre of Transportation Research, Zilina, Slovac Republic, 2001

[Sum10] *Sumo-Wiki*. Version: 2010. `http://sourceforge.net/apps/mediawiki/sumo/`, Abruf: 30. Mai 2010

[Tat05] TATE, James: A novel research tool-: presenting the highly instrumented car. In: *Traffic engineering & control* 46 (2005), Nr. 7, S. 262–265

[The97] THEIS, Christiane: *Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen*, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe, Diss., 1997

[TKBA07] TOLEDO, Tomer ; KOUTSOPOULOS, Haris N. ; BEN-AKIVA, Moshe: Integrated driving behavior modeling. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 15 (2007), Nr. 2, 96 - 112. `http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2007.02.002`. – DOI 10.1016/j.trc.2007.02.002. – ISSN 0968–090X

[TKBA09] TOLEDO, Tomer ; KOUTSOPOULOS, Haris N. ; BEN-AKIVA, Moshe: Estimation of an integrated driving behavior model. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17 (2009), August, Nr. 4, S. 365–380. `http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2009.01.005`. – DOI 10.1016/j.trc.2009.01.005

[TKD+03] Toledo, Tomer ; Koutsopoulos, Haris N. ; Davol, Angus ; Ben-Akiva, Moshe E. ; Burghout, Wilco ; Andréasson, Ingmar ; Johansson, Tobias ; Lundin, Christen: Calibration and validation of microscopic traffic simulation tools: Stockholm Case Study. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1831 (2003), Nr. -1, S. 65–75

[TM74] Treiterer, Joseph ; Myers, Jeffrey A.: The hysteresis phenomenon in traffic flow. In: *Proceedings of the Sixth international Symposium on Transportation and Traffic Theory, Sydney* (1974), S. 13–38

[Tol03] Toledo, Tomer: *Integrated Driving Behavior Modeling*, Civil and Environmental Engineering - Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2003

[Tol08] Toledo, Tomer: *Integrated model of driving behavior*. Saarbrücken, Germany : VDM Verlag Dr. Müller, 2008

[Tra06] Trapp, Roland ; Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit (Hrsg.): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation*. FGSV Verlag, 2006

[Tre69] Treiterer, Joseph: Some aspects of the stability of traffic flow. In: Leutzbach, Wilhelm (Hrsg.) ; Baron, Paul (Hrsg.): *Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses : Referate anläßlich des IV. Internationalen Symposiums über die Theorie des Verkehrsflusses in Karlsruhe im Juni 1968*, Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Straßenbau, 1969, S. 8–13

[TRW05] TRW Automotive: *ACC Adaptive Cruise Control - DAS Driver Assistance Systems*. Version: 2005. `http://www.trw.com.br/produtos/cha_driver_assist_english.pdf`, Abruf: 05. Aug. 2010

[Ueb10] Uebe, Götz: *Theilsche Ungleichheitskoeffizient*. Version: 2010. `www.hsu-hh.de/download-1.4.1.php?brick_id=tgXGpUI8T5yyST2k`, Abruf: 20. Jun. 2010

[Ves02] Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken - Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität*. München : Deutscher Taschenbuch Verlag, 2002

[VMS08] Vortisch, Peter ; Menneni, Sandeep ; Sun, Carlos: Kalibrierung von Fahrverhaltensparametern in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation mit Hilfe evolutionärer Algorithmen. In: *Straßenverkehrstechnik* 5 (2008), S. 274–279

[Vol02] Volkswagen AG: Umweltbericht 2001/2002- Mobilität und Nachhaltigkeit / Volkswagen AG. 2002. – Forschungsbericht

[VSK+01] VanderWerf, Joel ; Shladover, Steven ; Kourjanskaia, Natalia ; Miller, Mark ; Krishnan, Hariharan: Modeling Effects of Driver Control Assistance Systems on Traffic. In: *Transportation Research Record* 1748 (2001), S. 167–174

[VSKL+07] Vollrath, Mark ; Schiessl, Caroline ; Knake-Langhorst, Sascha ; Totzke, Ingo ; Buld, Susanne ; Benmimoun, Ahmed: Adapting ADAS to traffic states: an approach of human-centered automation. In: Ertico ITS Europe (Hrsg.): *6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, 2007

[VTD10] *Virtual Test Drive*. Version: 2010. `http://www6.in.tum.de/Main/ResearchVtd`, Abruf: 24. Jul 2010

[Wie74] Wiedemann, Rainer: *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. Bd. Heft 8 der Schriftenreihe des IfV. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974

[Wik10] *Wikipedia - Stichwort "Verkehrsfluss"*. Version: 2010. `http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsfluss`, Abruf: 05. Aug. 2010

[Wil00] Willke, Helmut: *Systemtheorie I - Grundlagen*. Stuttgart : Lucius & Lucius, 2000

[Wil04] Wiltschko, Thomas: *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*, Universität Stuttgard, Diss., 2004

[Wit96] Witte, Stefan: *Simulationsuntersuchnungen zum Einfluß von Fahrverhalten und technischen Abstandsregelsystemen auf den Kolonnenverkehr*, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Diss., 1996

[Woh05] Wohlers, Wolfgang: *Mehrstufige Optimierung komplexer strukturmechanischer Probleme*. Cuvillier, E., 2005

[XAHM05] Xiao, Haifeng ; Ambadipudi, Ravi ; Hourdakis, John ; Michalopoulos, Panos: Methodology for selecting microscopic simulators: Comparative evaluation of AIMSUN and VISSIM / Intelligent Transportation Systems Institute, University of Minnesota. 2005. – Forschungsbericht

[YK96] Yang, Qi ; Koutsopoulos, Haris N.: A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. In: *Transportation Research Part C* 4 (1996), Nr. 3, S. 113–129

[ZA97] Zwaneveld, Peter J. ; Arem, Bart van: Traffic effects of Automated Vehicle Guidance Systems - A literature survey / TNO Inro, Delft, The Netherlands. 1997 (INRO-VVG 1997-17). – Forschungsbericht

[Zap10] Zapp, Kerstin: Mobilitätssicherung durch intelligente Vernetzung. In: *Internationales Verkehrswesen* (62)3 (2010), S. 34–35

[Zen07] Zentralstelle für Informationssysteme bei der Autobahndirektion Südbayern: Straßenverkehrszählung 2005 - Verkehrsbelastung der Straßen des überörtlichen Verkehrs in Bayern / Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern. 2007. – Forschungsbericht

[ZJ08] Zhang, Michael ; Jingtao, Ma: Developing Calibration Tools for Microscopic Traffic Simulation Final Report Part 1: Overview Methods and Guidelines on Project Scoping and Data Collection / California Path Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkely. 2008. – Forschungsbericht

[ZJD08] Zhang, Michael ; Jingtao, Ma ; Dong, Hu: Developing Calibration Tools for Microscopic Traffic Simulation Final Report Part 2: Calibration Framework and Calibration of Local/Global Driving Behavior and Departure/Route Choice Model Parameters / California Path Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkely. 2008. – Forschungsbericht